



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TM141576

**STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISA REDUKSI
RESPON GETARAN TRANSLASI, *ROLLING*, DAN
PITCHING MENGGUNAKAN SISTEM
TRANSLATIONAL MASS VIBRATION ABSORBER
(*TMVA*)**

INTAN MAHARDIKA
NRP 021114400093

Dosen Pembimbing:
Dr. Wiwiek Hendrowati ST., MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR – TM141576

**STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISA REDUKSI RESPON
GETARAN TRANSLASI, *ROLLING*, DAN *PITCHING*
MENGUNAKAN SISTEM *TRANSLATIONAL MASS
VIBRATION ABSORBER* (TMVA)**

INTAN MAHARDIKA
NRP 02111440000093

Dosen Pembimbing:
Dr. Wiwiek Hendrowati ST., MT.

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT – TM141576

**ANALYSIS AND EXPERIMENTAL STUDY OF
TRANSLATIONAL, ROLLING, AND PITCHING
MOTION VIBRATION RESPONSE REDUCTION USING
TRANSLATIONAL MASS VIBRATION ABSORBER
(TMVA)**

INTAN MAHARDIKA
NRP 02111440000093

Advising Lecturer:
Dr. Wiwiek Hendrowati ST., MT.

MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

**STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISA REDUKSI
RESPON GETARAN TRANSLASI, ROLLING, DAN
PITCHING MENGGUNAKAN SISTEM
TRANSLATIONAL MASS VIBRATION ABSORBER
(TMVA)**

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

INTAN MAHARDIKA
NRP. 02111440000093

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT. (Pembimbing)
NIP. 197004121997032003
2. Dr. Harus Laksana Guntur, ST. M.Eng (Penguji I)
NIP. 197505111999031001
3. Aida Annisa Amin Daman, ST., MT. (Penguji II)
NIP. 198907052015042005
4. Ari Kurniawan Saputra, ST., MT. (Penguji III)
NIP. 198604012015041001

SURABAYA

JULI, 2018

**STUDI EKSPERIMEN DAN ANALISA REDUKSI
RESPON GETARAN TRANSLASI, ROLLING, DAN
PITCHING MENGGUNAKAN SISTEM
TRANSLATIONAL MASS VIBRATION ABSORBER
(TMVA)**

Nama Mahasiswa : Intan Mahardika
NRP : 02111440000093
Jurusan : Teknik Mesin
Dosen Pembimbing : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

Abstrak

Setiap peralatan mekanis dan mesin-mesin, akan mengalami getaran ketika beroperasi. Ketika besarnya frekuensi getaran sama dengan frekuensi natural sistem, maka dapat mengakibatkan penurunan efisiensi dan memperpendek umur pakai mesin. Salah satu cara untuk mencegahnya yaitu dengan penambahan komponen pereduksi getaran, yang disebut dengan DVA (Dynamic Vibration Absorber). Pada tahun 2017, telah dilakukan penelitian mengenai DVA model beam oleh Ricky Bramudia Kurniawan dan Vincent. Namun, rancang bangun pada penelitian tersebut cukup kompleks. Sehingga dalam penelitian ini, penulis akan membahas alternatif rancang bangun DVA dengan desain yang lebih sederhana menggunakan sistem utama yang telah disempurnakan pada penelitian Nauval Adhytia.

Pada penelitian tugas akhir ini, dilakukan rancang bangun dan studi eksperimental mengenai mekanisme kerja sebuah peredam dengan gerakan translasi vertikal saja, yang disebut TMVA (Translational Mass Vibration Absorber). TMVA didesain berbentuk selongsong silinder yang berisi beberapa koin besi sebagai massa peredam dengan sebuah pegas dibawahnya. TMVA tersebut diletakkan di atas sistem utama yang terdiri dari plat exciter, spring rod suspensi, dan poros penggerak. Sistem utama diatur agar bergerak dalam 3 DOF, yaitu arah translasi, rolling, dan pitching dengan penggantian keempat pegas yang

memiliki nilai koefisien berbeda. Variasi yang digunakan yaitu, jumlah koin pemberat dan posisi peletakan TMVA.

Eksperimen dilakukan dalam dua kondisi, yaitu kondisi sistem utama sebelum dan setelah ditambahkan TMVA. Didapatkan hasil berupa respon percepatan dan persentase reduksi untuk setiap variasi jumlah koin dan posisi TMVA. Dari hasil eksperimen dapat disimpulkan bahwa penambahan 4 koin pada TMVA, paling efektif dalam mereduksi getaran sistem utama. Dan peletakan TMVA pada node 7 variasi 4 koin paling baik dalam meredam getaran 3 dof dari sistem utama, dengan nilai reduksi untuk translasi sebesar 93,65%, rolling 84,28%, dan pitching 90,98%.

Kata kunci: getaran multi DOF, jumlah koin, posisi TMVA, respon getaran, Translational Mass Vibration Absorber.

**ANALYSIS AND EXPERIMENTAL STUDY OF
TRANSLATIONAL, ROLLING, AND PITCHING
MOTION VIBRATION RESPONSE REDUCTION USING
TRANSLATIONAL MASS VIBRATION ABSORBER
(TMVA)**

Student Name : Intan Mahardika
NRP : 02111440000093
Department : Mechanical Engineering FTI-ITS
Advising Lecturer : Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.

Abstract

Every mechanical equipments and machineries will experience vibrations as they operate. If such vibrations' frequency happen to be equal to a system's natural frequency, the result will be a degradation of the equipments efficiency and shortening of its working lifespan. One way to avoid this is an addition of a vibration reducing equipment known as DVA (Dynamic Vibration Absorber). In 2017, a study has been conducted on a beam-type DVA by Ricky Bramudia Kurniawan and Vincent. However, this type of DVA design was complex and complicated. Therefore, in this paper, the writer will propose and discuss an alternative of the DVA with a much simpler design using a main system that has been improved on Nauval Adhytia's theses.

In this final project paper, the writer will propose a ground-up design and experimental study of a working mechanics of a vibration absorber that is made to be exclusively translational in motion, called the TMVA (Translational Mass Vibration Absorber). This TMVA is a cylindrical which houses a few solid steel coins that act as absorbing mass that are attached to a spring beneath them. This TMVA is then attached on top of the main system comprising an exciter plate, a spring rod suspension, and a mover shaft. The main system in this final project is design to be able to move in 3 DOF's, which are translational, rolling, and

pitching. The 4 springs are on each corner with varying stiffness coefficient. Variables to be used are the number of coins used and where the TMVA are placed on top of the main system.

The experiment were done in two differing conditions. The first one being the main system only without the addition of the TMVA, and the second one, the main system with the TMVA attached. The results gathered are acceleration response and reduction percentage values for each variation of number of coins used and the position of the TMVA. From this experiment, it can be concluded that the use of 4 coins is the most effective in reducing the main system's vibration. Position wise, attachment of the TMVA on node 7 with 4 coins is the most effective in reducing 3 DOF vibrations from the main system, with reduction values reaching as high as 93.65%, 84.28%, and 90.98% in translational, rolling, and pitching motion respectively.

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segenap rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Studi Eksperimen dan Analisa Reduksi Respon Getaran Translasi, Rolling, dan Pitching Menggunakan Sistem Translational Mass Vibration Absorber (TMVA)”**. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan S-1 di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi sepuluh Nopember Surabaya.

Dalam penyusunan Tugas Akhir ini, banyak pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuannya sehingga dapat terselesaikan sesuai dengan waktu yang diharapkan. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terimakasih kepada pihak-pihak tersebut, antara lain:

1. Kedua orang tua penulis, Bapak **Agus Budi Upoyo** dan Ibu **Sugeng Hariati**, serta kakak perempuan penulis, **Dian Maharani** yang telah memberikan bimbingan, dukungan dalam segala bentuk, dan doa yang tak henti-hentinya agar segala urusan penulis dimudahkan dan dilancarkan oleh Allah SWT.
2. **Dr. Wiwiek Hendrowati, ST., MT.** selaku dosen pembimbing Tugas Akhir yang telah meluangkan waktu untuk memberikan segala bimbingan, ilmu, serta masukan selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
3. **Dr. Harus Laksana Guntur, ST., M.Eng., Aida Annisa Amin Daman, ST., MT., dan Ari Kurniawan Saputra, ST., MT.** selaku dosen penguji dalam sidang Tugas Akhir penulis yang telah memberikan masukan dan saran untuk Tugas Akhir ini.
4. **Sanditra Muda Yusviva** yang selalu memberikan semangat, dukungan, dan doa dalam menyelesaikan Tugas Akhir.

5. **Pak Karmono** selaku karyawan Laboratorium Motor Bakar yang telah membantu memperbaiki alat-alat kebutuhan eksperimen Tugas Akhir.
6. Seluruh jajaran warga Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya.
7. Keluarga besar M 57, Sarekat Merah Rakyat Mesin (SMRM), segenap jajaran dosen serta tenaga pendidik di Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS, dan juga pihak yang belum disebutkan di atas, yang telah memberikan dukungan, doa, dan bantuannya terhadap penulisan laporan Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu, kritik dan saran dari pembaca akan diterima untuk menjadikan Tugas Akhir ini lebih baik lagi.

Surabaya, 28 Juli 2018

Penulis

DAFTAR ISI

Abstrak.....	i
Abstract	iii
KATA PENGANTAR.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB I.....	xvi
PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II.....	4
TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 <i>Multi Degree of Freedom</i> (MDOF).....	5
2.2 <i>Base Motion Vibration</i>	7
2.3 <i>Dynamic Vibration Absorber</i> (DVA)	9
2.3.1 <i>Undamped Dynamic Vibration Absorber</i>	9
2.3.2 <i>Damped Dynamic Vibration Absorber</i>	12
2.4 Penelitian Terdahulu	14
BAB III	23
METODOLOGI PENELITIAN	23
3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian	23
3.2 Penjelasan Tahap Penelitian.....	24
3.2.1 Studi Literatur	24
3.2.2 Identifikasi Masalah.....	25
3.2.3 Perancangan Mekanisme TMVA	25
3.2.4 Rancang Bangun TMVA.....	42
3.2.5 Eksperimen	47
3.2.6 Pengambilan Data Eksperimen	49
3.2.7 Analisa Data dan Pembahasan	52
3.2.8 Kesimpulan dan Saran	52

BAB IV	53
ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN.....	53
4.1 Pelaksanaan dan Kelengkapan Alat Eksperimen	53
4.1.1 Sistem Utama	54
4.1.2 <i>Translational Mass Vibration Absorber</i> (TMVA) ..	55
4.2 Analisa Eksperimen	56
4.2.1 Sistem Utama tanpa TMVA	57
4.2.2 Sistem Utama dengan Penambahan TMVA	59
BAB V	79
KESIMPULAN DAN SARAN	79
5.1 Kesimpulan	79
5.2 Saran	80
DAFTAR PUSTAKA.....	81
LAMPIRAN	83
BIODATA PENULIS.....	93

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Model Ekuivalen untuk Sistem Rotor <i>Active Magnetic Bearing</i> (AMB) [6].....	5
Gambar 2.2 (a) <i>Base Excitation</i> , (b) <i>Base Excitation Free Body Diagram</i> [1].....	7
Gambar 2.3 Grafik Hubungan (a) <i>Amplitudo Ratio</i> dengan <i>Frequency Ratio</i> , (b) <i>Phase Angle</i> dengan <i>Frequency Ratio</i> [1].....	9
Gambar 2.4 <i>Undamped Dynamic Vibration Absorber</i> [6]	10
Gambar 2.5 Pengaruh <i>Undamped Vibration Absorber</i> terhadap Respon pada Sistem Utama [6].....	11
Gambar 2.6 <i>Damped Dynamic Vibration Absorber</i> [2]	12
Gambar 2.7 Pengaruh dari <i>Damped Vibration Absorber</i> terhadap Respon Sistem Utama [2]	14
Gambar 2.8 Posisi Penyusunan <i>Accelerometer</i> untuk <i>Multi Axis Testing</i> [7].....	15
Gambar 2.9 Grafik RMS Masing-Masing Titik Pengujian [7]	16
Gambar 2.10 Rancangan Meja Getar [4]	17
Gambar 2.11 Grafik Respon Perpindahan Massa dengan Variasi Amplitudo Sumber Getar [4].....	17
Gambar 2.12 Grafik Respon Perpindahan Massa Utama dengan Variasi Frekuensi Operasional Motor [4].....	18
Gambar 2.13 Model Matematis Sistem yang Ditambahkan <i>Damped Dynamic Vibration Absorber</i> (DVA) [8].....	19
Gambar 2.14 Grafik Respon Sistem setelah Ditambahkan <i>Damped Dynamic Vibration Absorber</i> [8].....	19
Gambar 2. 15 (a) Rancangan <i>Assembly DVA</i> (b) Rancangan Tumpuan DVA [6]	21
Gambar 2.16 Mekanisme Gabungan [6].....	21

Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian.....	24
Gambar 3.2 Rancangan TMVA.....	26
Gambar 3. 3 Sistem Utama[2]	26
Gambar 3.4 Rancangan Sistem Gabungan.....	27
Gambar 3.5 Skema Sistem Utama (a) Tanpa TMVA dan (b) Ditambahkan TMVA	28
Gambar 3.6 <i>Free Body Diagram</i> Sistem Utama tanpa TMVA	29
Gambar 3.7 <i>Free Body Diagram</i> Gerak <i>Rolling</i> oleh Massa Utama.....	31
Gambar 3.8 <i>Free Body Diagram</i> Gerak <i>Pitching</i> oleh Massa Utama.....	32
Gambar 3.9 <i>Free Body Diagram</i> (a) TMVA dan (b) Sistem Utama.....	33
Gambar 3.10 Skema Posisi Peletakan TMVA Dilihat dari Tampak Atas	39
Gambar 3. 11 Grafik Hasil <i>Filter</i> dan <i>Smoothing</i> untuk Pegas TMVA.....	40
Gambar 3. 12 <i>Bode Diagram</i> Sistem 3 DOF	42
Gambar 3.13 Desain <i>Body</i> Luar TMVA.....	43
Gambar 3. 14 Enam Buah Koin yang Digunakan sebagai Massa TMVA.....	44
Gambar 3. 15 Variasi Jumlah Koin pada (a) Percobaan 1, (b) Percobaan 2, dan	44
Gambar 3.16 Pegas TMVA	46
Gambar 3.17 <i>Flowchart</i> Sistematika Pelaksanaan Eksperimen	48
Gambar 3. 18 Gerak Rotasi pada Plat <i>Exciter</i>	49
Gambar 3.19 Posisi Pengujian dengan <i>Probe Accelerometer</i> (a) Sistem Utama tanpa TMVA.....	50
Gambar 3.20 Skema Alat Pengujian.....	50
 Gambar 4. 1 Perlengkapan Eksperimen (a) <i>Power Supply</i> , (b) <i>Tachometer</i> , (c) <i>Probe Accelerometer</i> , (d)	

Adaptor, (e) Kabel Penghubung Adaptor dengan <i>Oscilloscope</i> , (f) <i>Oscilloscope</i>	53
Gambar 4. 2 Pelaksanaan Eksperimen.....	54
Gambar 4. 3 Sistem Utama.....	54
Gambar 4. 4 TMVA (<i>Translational Mass Vibration Absorber</i>)	56
Gambar 4. 5 Komponen-Komponen TMVA (a) Selongsong Akrilik, (b) Pegas Baja dan Alas TMVA, (c) 6 Buah Koin Pemberat, dan (d) Mur dan Baut ..	56
Gambar 4. 6 Hasil <i>Smoothing</i> dan <i>Filtering</i> Sistem Utama tanpa TMVA (a) Respon Translasi dan (b) Respon Rotasi.....	58
Gambar 4. 7 (a) Grafik RMS 3 dof untuk Sistem Utama tanpa TMVA (b) Posisi Peletakan <i>Probe</i> pada Plat <i>Exciter</i>	58
Gambar 4. 8 (a) Grafik RMS Respon Percepatan Translasi Variasi Jumlah Koin dan	62
Gambar 4. 9 Grafik Reduksi Respon Getaran Translasi Variasi Jumlah Koin	62
Gambar 4. 10 (a)Grafik RMS Percepatan <i>Rolling</i> Variasi Jumlah Koin dan (b) Variasi Posisi Peletakan TMVA pada Plat <i>Exciter</i>	65
Gambar 4. 11 Grafik Reduksi Respon Percepatan <i>Rolling</i> Variasi Jumlah Koin	65
Gambar 4. 12 (a) Grafik RMS Percepatan <i>Pitching</i> Variasi Jumlah Koin dan (b) Variasi Posisi Peletakan TMVA pada Plat <i>Exciter</i>	68
Gambar 4. 13 Grafik Reduksi Respon Percepatan <i>Pitching</i> Variasi Jumlah Koin	68
Gambar 4. 14 (a) Grafik RMS Translasi untuk Jumlah Koin 2, 4, dan 6 Buah dengan Variasi Posisi TMVA (b) Variasi Posisi Peletakan TMVA	69
Gambar 4. 15 Grafik Reduksi Respon Percepatan Translasi Variasi Posisi TMVA	70

Gambar 4. 16	(a) Grafik RMS Percepatan <i>Rolling</i> Variasi Posisi TMVA dan (b) Variasi Posisi Peletakan TMVA	71
Gambar 4. 17	Grafik Reduksi Respon <i>Rolling</i> Variasi Posisi TMVA	72
Gambar 4. 18	(a) Grafik RMS Percepatan <i>Pitching</i> Variasi Posisi TMVA dan (b) Variasi Posisi Peletakan TMVA	73
Gambar 4. 19	Grafik Reduksi Respon <i>Pitching</i> Variasi Posisi TMVA	74
Gambar 4. 20	Grafik Respon Percepatan 3 DOF Variasi Posisi TMVA untuk 4 Buah Koin	75
Gambar 1	Grafik Respon Percepatan Sistem Utama tanpa TMVA Hasil <i>Filter</i> dan <i>Smoothing</i> MATLAB (a) Translasi dan (b) Rotasi	83
Gambar 2	Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada <i>Node 1</i> untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin	84
Gambar 3	Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada <i>Node 2</i> untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin	85
Gambar 4	Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada <i>Node 3</i> untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin	86
Gambar 5	Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada <i>Node 4</i> untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi	

	4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin	87
Gambar 6	Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada <i>Node</i> 5 untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin	88
Gambar 7	Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada <i>Node</i> 6 untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin	89
Gambar 8	Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada <i>Node</i> 7 untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin	90
Gambar 9	Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada <i>Node</i> 8 untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin	91
Gambar 10	Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada <i>Node</i> 9 untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin	92

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Massa Utama	37
Tabel 3.2 Data Eksperimen Respon Percepatan Sistem Utama	51
Tabel 4. 1 Data Respon Percepatan Translasi.....	61
Tabel 4. 2 Data Respon Percepatan <i>Rolling</i>	64
Tabel 4. 3 Data Respon Percepatan <i>Pitching</i>	67
Tabel 4. 4 Data Respon Percepatan 3 DOF Variasi Posisi TMVA ketika Jumlah Koin 4 Buah	75
Tabel 4. 5 Reduksi Respon Translasi, <i>Rolling</i> , dan <i>Pitching</i> Hasil Eksperimen dan Simulasi	77

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Getaran merupakan gerak bolak-balik dalam suatu interval waktu tertentu. Setiap peralatan mekanis dan mesin-mesin, akan mengalami getaran ketika beroperasi contohnya, mesin *milling*, mesin bubut, kendaraan bermotor, hingga peralatan besar seperti generator. Getaran yang terjadi pada mesin-mesin tersebut merupakan hal yang wajar jika masih dalam batas toleransi. Namun, ketika besarnya frekuensi getaran yang dialami mesin telah menyamai nilai frekuensi naturalnya, maka getaran yang terjadi dianggap melebihi batas toleransi. Sehingga akan terjadi resonansi yang berdampak pada penurunan efisiensi mesin. Seiring berjalannya waktu, kerusakan pada komponen mekanik sistem akibat getaran tersebut akan memperpendek umur pakai mesin. Penambahan komponen pereduksi getaran, merupakan salah satu cara untuk mencegah terjadinya hal tersebut.

Penelitian-penelitian yang telah dilakukan oleh Ricky dan Vincent pada tahun 2017 mengenai sistem peredam getaran dengan DVA, membuktikan bahwa DVA mampu mereduksi getaran yang terjadi pada sistem utama. Namun, desain yang dirancang dalam penelitian-penelitian sebelumnya memiliki rancang bangun yang cukup kompleks. Sehingga dalam penelitian ini, penulis akan membahas alternatif rancang bangun DVA dengan desain yang lebih sederhana.

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka telah dilakukan studi eksperimental dalam skala laboratorium mengenai mekanisme kerja DVA untuk meredam getaran berlebih pada sebuah sistem yang terpasang pada simulator getaran. Sistem utama yang menjadi bahan eksperimen, merupakan sistem yang terdiri dari massa utama yang ditopang empat buah pegas. Massa tersebut akan dikenai gaya

eksitasi dari massa eksentris motor DC sehingga sistem utama dapat bergetar dalam arah translasi vertikal, *rolling*, dan *pitching*. Getaran yang diakibatkan tersebut nantinya akan direduksi oleh sebuah DVA, dimana DVA tersebut terdiri dari sebuah pegas dan massa koin yang pergerakannya dibatasi secara translasi vertikal oleh sebuah selongsong silinder, yang disebut dengan TMVA (*Translational Mass Vibration Absorber*). Analisa yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu mengenai pengaruh variasi jumlah koin pemberat dan posisi peletakan TMVA.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, diperlukan suatu rancangan mekanisme TMVA yang dapat mereduksi getaran translasi, *rolling*, dan *pitching* dari sistem utama. Sehingga didapatkan rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang suatu *prototype* sistem TMVA dengan arah pergerakan translasi vertikal yang mampu meredam getaran pada sistem utama dalam arah-arah translasi vertikal, *rolling*, dan *pitching*?
2. Bagaimana pengaruh variasi jumlah koin pemberat dalam mereduksi getaran sistem utama?
3. Bagaimana pengaruh variasi posisi peletakan TMVA dalam mereduksi getaran sistem utama?

1.3 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

1. Sumber getaran hanya berasal dari motor DC yang dihubungkan dengan massa ekstentris dan pegas (simulator getaran).
2. Gaya eksitasi yang berasal dari simulator getaran bekerja tepat di tengah plat datar.

3. Gaya eksitasi pada sistem utama menyebabkan pergerakan translasi ke arah vertikal, *rolling*, dan *pitching*. Sedangkan TMVA hanya mengalami pergerakan translasi ke arah vertikal.
4. Penelitian dititik beratkan pada alat pereduksi getaran (TMVA).
5. Gesekan pada pegas dan komponen bergerak lainnya diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, dapat diketahui tujuan penelitian, sebagai berikut:

1. Mendapatkan suatu rancangan *prototype* sistem TMVA dengan arah pergerakan translasi vertikal yang mampu meredam getaran pada sistem utama dalam arah-arrah translasi vertikal, *rolling*, dan *pitching*.
2. Mengetahui pengaruh variasi jumlah koin pemberat dalam meredam getaran sistem utama.
3. Mengetahui pengaruh variasi posisi peletakan TMVA dalam mereduksi getaran sistem utama.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini yaitu:

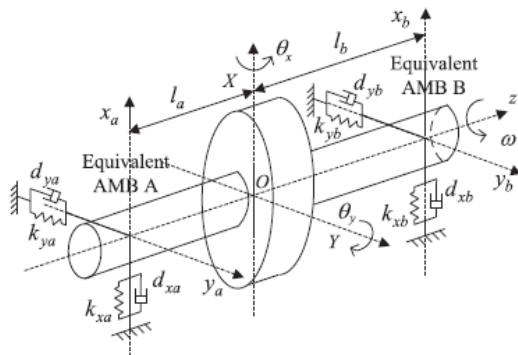
1. Sebagai referensi dan literatur untuk penelitian TMVA dalam mereduksi getaran sistem utama arah translasi vertikal, *rolling*, dan *pitching* selanjutnya.
2. Sebagai pengembangan pemahaman terhadap sistem TMVA.
3. Sebagai inovasi alat pereduksi getaran sistem dinamik pada alat permesinan.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Multi Degree of Freedom (MDOF)*

Derajat kebebasan atau *Degree of Freedom* merupakan jumlah minimum dari koordinat independen yang diperlukan untuk menentukan posisi dari bagian-bagian sistem yang dianalisa. Dalam dunia *engineering*, hampir semua sistem memiliki lebih dari satu derajat kebebasan yang dikenal dengan sistem *Multi Degree of Freedom*. Setiap derajat kebebasan memiliki frekuensi natural masing-masing. Berikut ini merupakan contoh sistem multi DOF:



Gambar 2.1 Model Ekuivalen untuk Sistem Rotor *Active Magnetic Bearing (AMB)* [6]

Berdasarkan teori mekanika, sifat-sifat pergerakan *rigid* rotor dapat dideskripsikan dengan pergerakan 6 DOF, yaitu 3 pergerakan linear pada 2 sumbu radial dan 1 sumbu aksial dan 3 gerakan berputar pada sumbu-sumbu tersebut. Gambar 2.1 menunjukkan sistem rotor AMB pada titik A dan B yang setara dengan 4 buah *spring-damper* pada 4 arah yang berbeda. Titik O merupakan pusat massa rotor, dimana jaraknya dengan A dan B dinotasikan dengan I_a dan I_b [6].

Pergerakan rotor dapat diklasifikasikan menjadi 2 tipe, yaitu tipe 1 dan tipe 2. Tipe 1 mendefinisikan pergerakan rotor sebagai $[X, \theta_y, Y, \theta_x]$. X dan Y adalah pergerakan linear dari titik pusat rotor ke sumbu x dan y , sementara θ_y dan θ_x adalah pergerakan angulernya. Di lain sisi, tipe 2 mendefinisikan pergerakan rotor berdasarkan lokasi rotor terhadap titik A dan B, yaitu $[x_a, x_b, y_a, y_b]$. x_a dan y_a adalah koordinat lokasi rotor terhadap AMB A, sedangkan AMB B adalah x_b, y_b .

Transfer relation antara 2 tipe di atas, ditunjukkan oleh matriks di bawah ini:

$$\begin{bmatrix} X \\ \theta_y \\ Y \\ \theta_x \end{bmatrix} = \frac{1}{l} \begin{bmatrix} l_b & l_a & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_b & l_a \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ y_a \\ y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_a & 0 & 0 \\ 1 & -l_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & l_a \\ 0 & 0 & 1 & -l_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ \theta_y \\ Y \\ \theta_x \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Persamaan gerak dari rotor dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} m\ddot{X} &= -(d_{xa}\dot{x}_a + k_{xa}x_a) - (d_{xb}\dot{x}_b + k_{xb}x_b) + F_x \\ J\ddot{\theta}_y &= -(d_{xa}\dot{x}_a + k_{xa}x_a)l_a + (d_{xb}\dot{x}_b + k_{xb}x_b)l_b + M_x \\ m\ddot{Y} &= -(d_{ya}\dot{y}_a + k_{ya}y_a) - (d_{yb}\dot{y}_b + k_{yb}y_b) + F_y \\ J\ddot{\theta}_x &= -(d_{ya}\dot{y}_a + k_{ya}y_a)l_a + (d_{yb}\dot{y}_b + k_{yb}y_b)l_b + M_y \end{aligned} \quad (2.2)$$

dimana, m adalah massa rotor, J adalah *transverse moment of inertia*. F_x, F_y adalah gaya eksitasi pada sumbu x dan y , sedangkan M_x, M_y adalah momen eksitasinya. *Equivalent stiffness* dari 4 arah dinotasikan dengan $k_{xa}, k_{xb}, k_{ya}, k_{yb}$, sedangkan *equivalent damping* yaitu $d_{xa}, d_{xb}, d_{ya}, d_{yb}$.

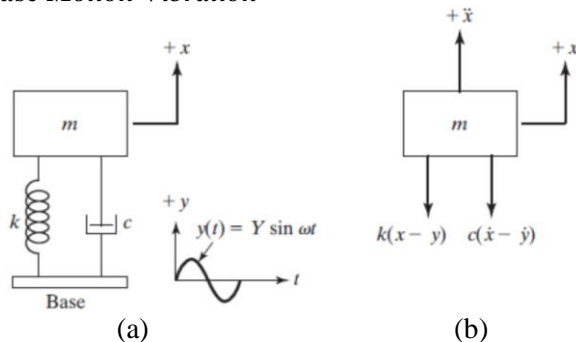
Dengan mensubstitusi persamaan (2) ke (1) didapatkan:

$$\frac{1}{l} \begin{bmatrix} ml_b & ml_a & 0 & 0 \\ J & -J & 0 & 0 \\ 0 & 0 & ml_b & ml_a \\ 0 & 0 & J & -J \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_a \\ \ddot{x}_b \\ \ddot{y}_a \\ \ddot{y}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{xa} & d_{xb} & 0 & 0 \\ d_{xa}l_a & -d_{xb}l_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d_{ya} & d_{yb} \\ 0 & 0 & d_{ya}l_a & -d_{yb}l_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_a \\ \dot{x}_b \\ \dot{y}_a \\ \dot{y}_b \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xa} & k_{xb} & 0 & 0 \\ k_{xa}l_a & -k_{xb}l_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{ya} & k_{yb} \\ 0 & 0 & k_{ya}l_a & -k_{yb}l_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ y_a \\ y_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ M_x \\ F_y \\ M_y \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Dengan penyelesaian menggunakan transformasi *Laplace*, diperoleh hasil berikut:

$$\begin{bmatrix} -m\omega^2 \frac{l_b}{l} + k_{xa} + j\omega d_{xa} & -m\omega^2 \frac{l_a}{l} + k_{xb} + j\omega d_{xb} & 0 & 0 \\ -J\omega^2 + k_{xa}l_a + j\omega d_{xa}l_a & J\omega^2 - k_{xb}l_b - j\omega d_{xb}l_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m\omega^2 \frac{l_b}{l} + k_{ya} + j\omega d_{ya} & -m\omega^2 \frac{l_a}{l} + k_{yb} + j\omega d_{yb} \\ 0 & 0 & -J\omega^2 + k_{ya}l_a + j\omega d_{ya}l_a & J\omega^2 - k_{yb}l_b - j\omega d_{yb}l_b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a(j\omega) \\ x_b(j\omega) \\ y_a(j\omega) \\ y_b(j\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x(j\omega) \\ M_x(j\omega) \\ F_y(j\omega) \\ M_y(j\omega) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

2.2 Base Motion Vibration



Gambar 2.2 (a) Base Excitation, (b) Base Excitation Free Body Diagram [1]

Gerak harmonik merupakan gerakan berulang dari sebuah sistem yang terdiri dari massa, pegas, dan peredam. Sedangkan *base of motion* yaitu pergerakan massa terhadap *base*. Jadi, *harmonic motion of the base* merupakan pergerakan massa secara berulang terhadap *base* yang didukung oleh pegas dan peredam dalam suatu interval waktu. Gambar 2.2 mengilustrasikan pergerakan tersebut, dimana $y(t)$ merupakan simpangan dari *base* dan $x(t)$ yaitu simpangan dari massa pada posisi *static equilibrium* saat waktu t . Maka total simpangan dari pegas adalah $x - y$ dan kecepatan relatif dari *damper* adalah $\dot{x} - \dot{y}$ ^[1].

Dari *free body diagram* pada gambar 2.2 (b), didapatkan persamaan gerak sebagai berikut:

$$m\ddot{x} + c(\dot{x} - \dot{y}) + k(x - y) = 0 \quad (2.5)$$

Jika $y(t) = Y\sin\omega t$ maka persamaan (2.5) menjadi:

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx &= c\dot{y} + ky \\ &= kY\sin\omega t + c\omega Y\cos\omega t \\ &= A\sin(\omega t - \alpha) \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dimana $A = Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}$ dan $\alpha = \tan^{-1}\left[-\frac{c\omega}{k}\right]$ maka respondari massa, $x_p(t)$ menjadi:

$$x_p(t) = \frac{Y\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \sin(\omega t - \phi_1 - \alpha) \quad (2.7)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{c\omega}{k - m\omega^2}\right) \quad (2.8)$$

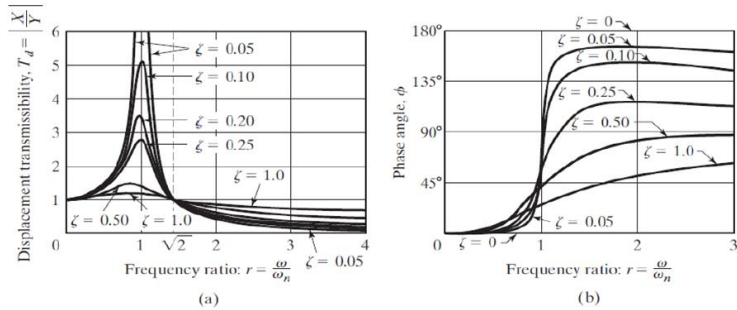
Dengan menggunakan identitas trigonometri, maka persamaan di atas dapat ditulis sebagai berikut:

$$x_p(t) = X\sin(\omega t - \phi) \quad (2.9)$$

Dimana nilai X dan ϕ didapat dari:

$$\frac{X}{Y} = \frac{\sqrt{k^2 + (c\omega)^2}}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \text{ dan } \phi = \tan^{-1}\left(\frac{m c \omega^2}{k(k - m\omega^2) + (c\omega)^2}\right) \quad (2.10)$$

Dimana $\frac{X}{Y}$ yaitu *displacement transmissibility*.



Gambar 2.3 Grafik Hubungan (a) *Amplitudo Ratio* dengan *Frequency Ratio*, (b) *Phase Angle* dengan *Frequency Ratio* [1]

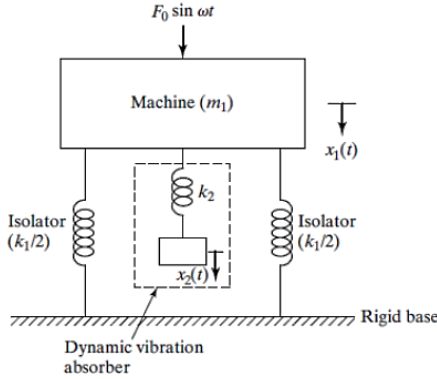
Gambar 2.3 di atas merupakan grafik hubungan *displacement transmissibility* dan sudut fase dengan rasio frekuensi pada sistem *base motion vibration*.

2.3 *Dynamic Vibration Absorber (DVA)*

Dynamic Vibration Absorber (DVA) didasarkan pada konsep penambahan massa sekunder dan pegas yang berfungsi untuk mereduksi getaran berlebih pada sistem utama. DVA dapat menyerap getaran dari berbagai arah eksitasi, tergantung pada komponen dan mekanisme DVA. Tanpa adanya DVA, getaran berlebih pada sistem utama akan sulit dikontrol sehingga mengakibatkan penurunan efisiensi dari sistem itu sendiri^[6].

2.3.1 *Undamped Dynamic Vibration Absorber*

Sebuah sistem memiliki massa utama yang dinamakan m_1 dan pegas dengan kekakuan k_1 . Penambahan DVA pada sistem mengakibatkan adanya massa *absorber* yaitu m_2 dan pegas yang memiliki kekakuan k_2 . Secara sederhana, sistem tersebut dimodelkan seperti gambar 2.4 di bawah ini:



Gambar 2.4 Undamped Dynamic Vibration Absorber [6]

Dari gambar di atas, didapatkan persamaan gerak dari m_1 dan m_2 , yaitu:

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) = F_0 \sin \omega t \quad (2.11)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) = 0 \quad (2.12)$$

Dengan asumsi persamaan harmonik, didapatkan:

$$x_j(t) = X_j \sin \omega t, \quad j = 1, 2 \quad (2.13)$$

Sehingga diperoleh amplitudo *steady state* m_1 dan m_2 , sebagai berikut:

$$X_1 = \frac{(k_2 - m_2 \omega^2) F_0}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \quad (2.14)$$

$$X_2 = \frac{k_2 F_0}{(k_1 + k_2 - m_1 \omega^2)(k_2 - m_2 \omega^2) - k_2^2} \quad (2.15)$$

Untuk dapat meredam getaran, maka nilai reduksi amplitudo dari massa utama (X_1) adalah nol. Nilai nol didapatkan jika numerator dari persamaan (2.14) bernilai nol juga. Ketika massa utama tanpa DVA beroperasi di daerah resonansi, maka $\omega_1 \approx \omega_2 = \frac{k_1}{m_1}$. DVA didesain agar memiliki frekuensi natural yang bernilai sama dengan frekuensi natural dari massa utama.

Sehingga persamaan di atas menjadi:

$$\omega_2 = \frac{k_2}{m_2} = \frac{k_1}{m_1} \quad (2.16)$$

Ketika pengoperasian dilakukan pada frekuensi resonansi, maka amplitudo getaran mesin menjadi nol, artinya

$$\delta_{st} = \frac{F_0}{k_1}, \quad \omega_1 = \left(\frac{k_1}{m_1}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.17)$$

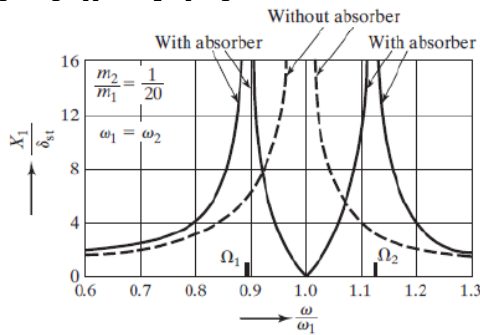
sebagai frekuensi natural, sedangkan

$$\omega_2 = \left(\frac{k_2}{m_2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.18)$$

sebagai frekuensi natural sistem DVA. Sehingga didapatkan persamaan berikut:

$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \frac{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (2.19)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \frac{1}{\left[1 + \frac{k_2}{k_1} - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \frac{k_2}{k_1}} \quad (2.20)$$



Gambar 2.5 Pengaruh *Undamped Vibration Absorber* terhadap Respon pada Sistem Utama [6]

Gambar 2.5 di atas menunjukkan variasi amplitudo getaran massa utama (X_1/δ_{st}) dengan kecepatan sudut (ω/ω_1). Ketika $X_1 = 0$ pada $\omega = \omega_1$ maka,

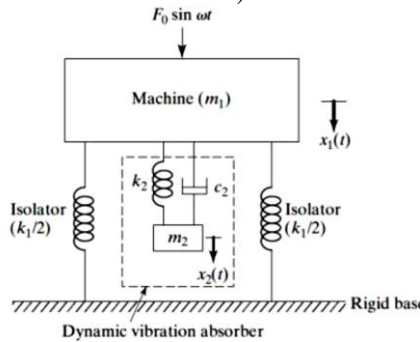
$$\omega_2 = \left(\frac{k_2}{m_2}\right)^{\frac{1}{2}}$$

Hal ini menunjukkan bahwa pegas berlawanan dengan gaya eksitasi dan berusaha untuk meniadakan gaya eksitasi di X_1 , sehingga X_1 berkurang hingga mendekati nol. Sehingga didapatkan parameter dari sistem DVA sebagai berikut:

$$k_2 X_2 = m_2 \omega^2 X_2 = -F_0 \quad (2.22)$$

2.3.2 Damped Dynamic Vibration Absorber

Subbab 2.3.1 di atas, menjelaskan bahwa puncak resonansi pada grafik respon sistem utama dapat dihilangkan. Hal ini dilakukan dengan cara penambahan *undamped* DVA pada sistem utama sehingga didapatkan 2 buah puncak baru. Namun, nilai amplitudo pada dua puncak tersebut sangat besar, sehingga perlu direduksi dengan peredam. Gambar 2.6 di bawah ini merupakan sistem DVA dengan peredam (*damped dynamic vibration absorber*).



Gambar 2.6 *Damped Dynamic Vibration Absorber* [2]

Berdasarkan gambar di atas, didapatkan persamaan gerak dari massa X_1 dan X_2 yaitu:

$$m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 + k_2 (x_1 - x_2) + c_2 (\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = F_0 \sin \omega t$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) + c_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_1) = 0$$

Dengan mengasumsikan penyelesaian harmonik, maka:

$$x_j(t) = X_j e^{i\omega t}, \quad j = 1, 2 \quad (2.25)$$

Sehingga didapatkan amplitudo *steady state* sebagai berikut:

$$X_1 = \frac{F_0(k_2 - m_2\omega^2 + ic_2\omega)}{[(k_1 - m_1\omega^2)(k_2 - m_2\omega^2) - m_2k_2\omega^2] + i\omega c_2(k_1 - m_1\omega^2 - m_2\omega^2)} \quad (2.26)$$

$$X_2 = \frac{X_1(k_2 + i\omega c_2)}{(k_2 - m_2\omega^2 + i\omega c_2)} \quad (2.27)$$

Dimana:

$$\mu = \frac{m_2}{m_1} = \text{mass ratio} = \text{absorber mass/main mass}$$

$$\delta_{st} = \frac{F_0}{k_1} = \text{static deflection of the system}$$

$$\omega_a^2 = \frac{k_2}{m_2} = \text{square of natural frequency of the absorber}$$

$$\omega_n^2 = \frac{k_1}{m_1} = \text{square of natural frequency of main mass}$$

$$f = \frac{\omega_a}{\omega_n} = \text{ratio of natural frequencies}$$

$$g = \frac{\omega}{\omega_n} = \text{forced frequency ratio}$$

$$cc = 2m\omega_n = \text{critical damping constant}$$

$$\zeta = \frac{c_2}{c_c} = \text{damping ratio}$$

Sehingga nilai X_1 dan X_2 dapat dinyatakan dalam persamaan berikut:

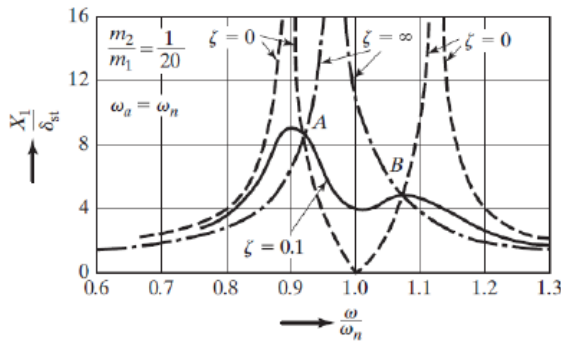
$$\frac{X_1}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + (g^2 - f^2)^2}{[(2\zeta g)^2(g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2]} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.28)$$

$$\frac{X_2}{\delta_{st}} = \left[\frac{(2\zeta g)^2 + f^4}{[(2\zeta g)^2(g^2 - 1 + \mu g^2)^2 + \{\mu f^2 g^2 - (g^2 - 1)(g^2 - f^2)\}^2]} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.29)$$

Persamaan 2.28 menunjukkan nilai amplitudo getaran dari massa utama yang merupakan fungsi dari μ , f , g , dan ζ . Gambar 2.7 di bawah ini menunjukkan grafik hubungan antara

$\left| \frac{X_1}{\delta_{st}} \right|$ terhadap *forced frequency ratio* (g) dengan nilai $f = 1$, $\mu = \frac{1}{20}$, dan variasi ζ adalah 0, 0.1, dan ∞ .

Gambar 2.7 di bawah ini menunjukkan bahwa, ketika redaman bernilai nol ($\zeta = 0$), maka resonansi terjadi pada dua frekuensi natural yang tidak teredam dari sistem. Ketika redaman tak terhingga ($\zeta = \infty$), massa utama dan massa *absorber* bekerja bersama-sama seolah-olah menjadi SDOF. Sedangkan saat redaman bernilai ($\zeta = 0.1$), maka puncak dari X_1 bernilai minimum.

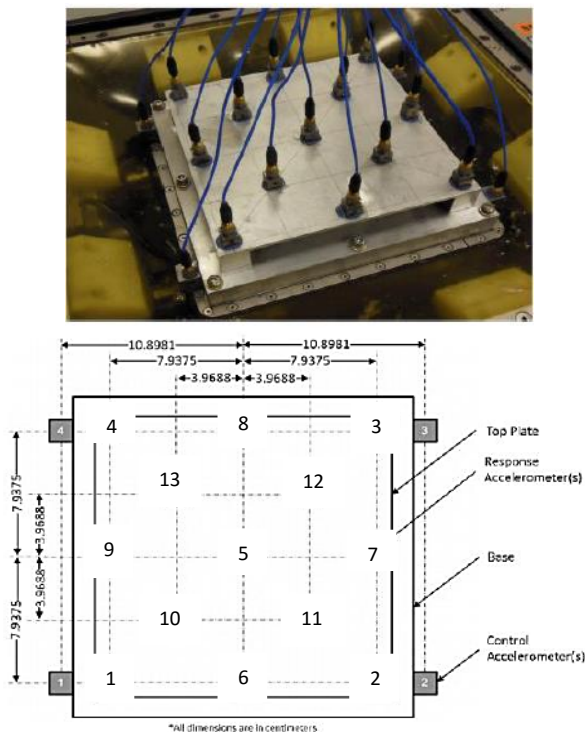


Gambar 2.7 Pengaruh dari *Damped Vibration Absorber* terhadap Respon Sistem Utama [2]

2.4 Penelitian Terdahulu

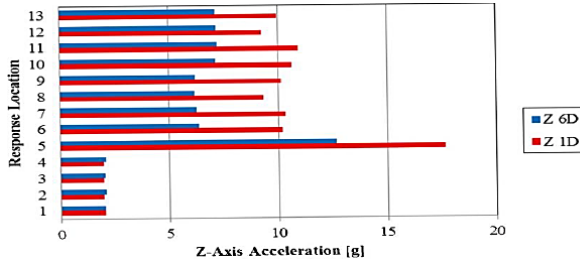
Pada tahun 2016, **Dr. Laura Jacobs O'malley** melakukan penelitian yang berjudul "*Response of Structure to SDoF vs MDoF Vibration Testing*". *Single DoF testing*, yaitu penelitian getaran yang terbatas pada satu arah gerakan saja. Sedangkan *multi DoF vibration testing* meninjau lebih dari satu arah pergerakan getaran. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui hubungan dari input *single axis* dan *multi axis* terhadap respon getaran multi nodal. Untuk itu, dilakukan perbandingan hasil penelitian secara pemodelan dan eksperimen untuk SDoF dan MdoF *vibration testing*.

Peralatan yang digunakan untuk *single axis test* yaitu, *Spectral Dynamics JAGUAR Shaker Control and Analysis System* sebagai *software* kontrol pengujian. Sedangkan untuk *multi axis test* adalah sistem *shaker Team Corporation TensorTM 900* dan *Unholtz-Dickie T2000*. Pengambilan data uji menggunakan *probe accelerometer* tipe PCB 356A33 yang dirangkai seperti gambar 2.8. Benda uji yang digunakan adalah plat persegi berdimensi 7 x 7 x 1/8 inch yang terbuat dari material aluminium 6061 yang ditumpu oleh empat kaki^[7].



Gambar 2.8 Posisi Penyusunan Accelerometer untuk *Multi Axis Testing* [7]

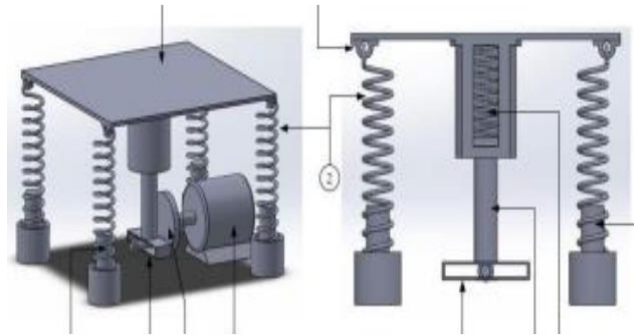
Dari hasil penelitian, didapatkan respon getaran yang ditangkap oleh *probe accelerometer* seperti pada gambar berikut:



Gambar 2.9 Grafik RMS Masing-Masing Titik Pengujian [7]

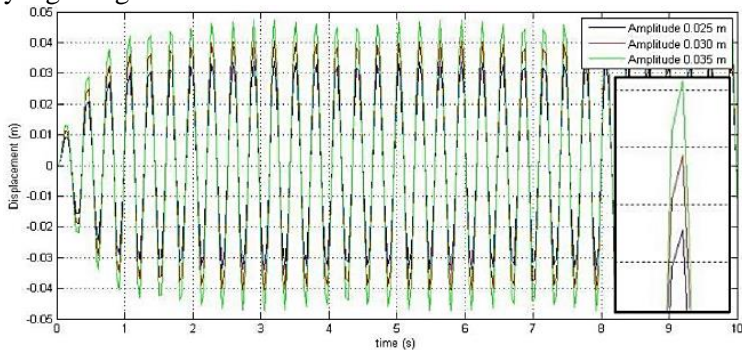
Tingkat RMS pada gambar 2.9 menunjukkan bahwa getaran pada titik berat plat memiliki respon percepatan getaran paling besar.

Pada tahun yang sama, **Wahyu Rachma Efendy** telah melakukan penelitian mengenai “Pemodelan dan Analisa Reduksi Respon Getaran Translasi pada Sistem Utama dan Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme *Dynamic Vibration Absorber Metode Cantilever Piezoelectric* (CPVA)“. Dirancang sebuah alat simulasi getaran berupa meja getar yang terdiri dari plat logam yang ditopang oleh 4 suspensi pegas di setiap sudutnya kemudian diberikan gaya eksitasi dari pegas yang dihubungkan oleh massa eksentrik motor DC, seperti pada gambar 2.10. Alat tersebut memiliki dimensi (50 x 50 x 30) cm^[4].

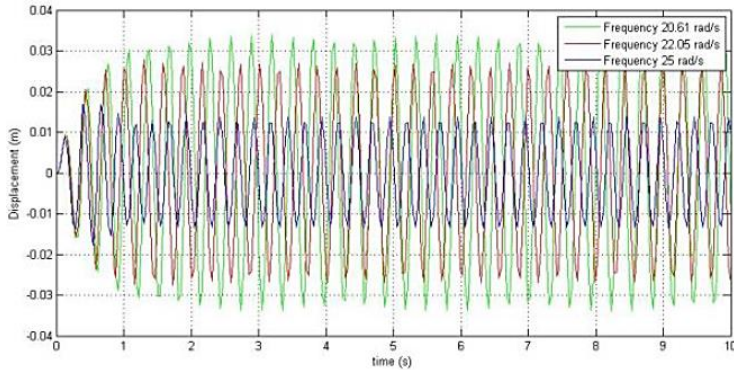


Gambar 2.10 Rancangan Meja Getar [4]

Parameter penelitian yang dilakukan oleh Wahyu adalah variasi amplitudo eksitasi dan frekuensi operasional dari sumber getar. Pemodelan yang dilakukan Wahyu terbatas pada getaran translasi arah vertikal, dengan nilai koefisien pegas yang seragam.



Gambar 2.11 Grafik Respon Perpindahan Massa dengan Variasi Amplitudo Sumber Getar [4]



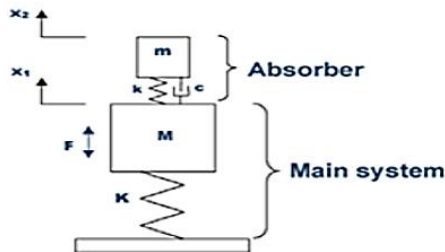
Gambar 2.12 Grafik Respon Perpindahan Massa Utama dengan Variasi Frekuensi Operasional Motor [4]

Dari hasil simulasi, dapat disimpulkan bahwa semakin besar amplitudo eksitasi sumber getar menyebabkan respon *displacement* pada plat sistem utama semakin besar, ditunjukkan oleh gambar 2.11. Dan semakin dekat frekuensi operasional motor ke frekuensi natural maka respon perpindahan juga semakin besar, ditunjukkan oleh gambar 2.12.

Penelitian selanjutnya dilakukan pada tahun 2016 oleh **Pachpute** dengan judul “*Optimum Design of Damped Dynamic Vibration Absorber – A Simulation Approach*”. Dilakukan simulasi pada sistem dengan *damped DVA* yang bertujuan untuk mengetahui respon getarannya. Variasi yang digunakan antara lain *mass ratio* (μ), *damping ratio* (ζ) dan *tuning ratio* (f). Pada sistem ini *mass ratio* (μ), *damping ratio* (ζ) dan *tuning ratio* (f) divariasikan untuk mendapatkan nilai optimum reduksi getaran dari sistem utama^[8].

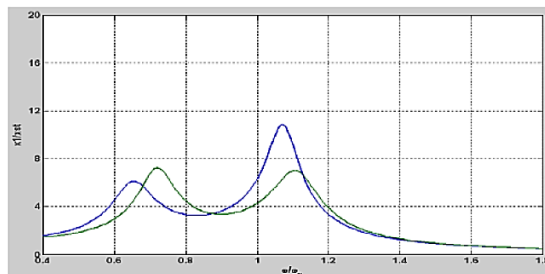
Gambar dibawah ini merupakan sistem yang terdiri dari pegas (k), peredam (c) dan massa *absorber* (m) yang dipasangkan pada sistem utama yang memiliki massa (M) dan

pegas (K). Penambahan *absorber* bertujuan mengontrol atau mereduksi getaran pada sistem utama.



Gambar 2.13 Model Matematis Sistem yang Ditambahkan *Damped Dynamic Vibration Absorber (DVA)* [8]

Dari hasil percobaan dapat diketahui bahwa *damped* DVA menghasilkan reduksi maksimal pada nilai *mass ratio* (μ) = 0.2, *damping ratio* (ζ) = 0.125 dan *tuning ratio* (f) = 0.7 sampai 0.8. Hal ini dibuktikan dari plot grafik respon $|x_1/\delta_{st}|$ terhadap *forced frequency ratio* ($g = \omega/\omega_n$) yang ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.14 Grafik Respon Sistem setelah Ditambahkan *Damped Dynamic Vibration Absorber* [8]

Garis hijau menunjukkan respon dari sistem utama, sedangkan garis biru menunjukkan respon dari sistem peredam. Dari grafik tersebut didapatkan bahwa semakin besar

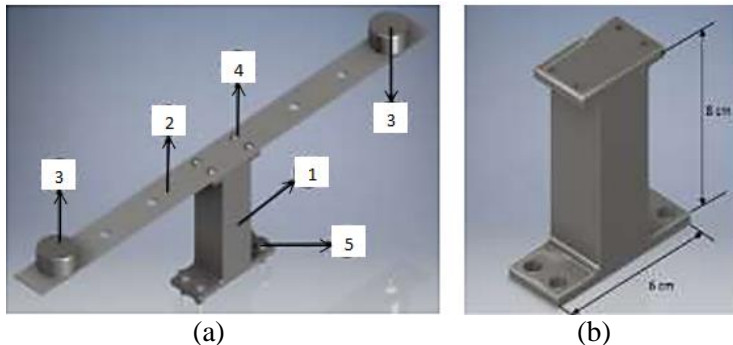
massa *absorber*, maka jarak yang memisahkan dua frekuensi natural sistem juga akan semakin besar. Hal tersebut menyebabkan rentang frekuensi operasi yang aman akan semakin lebar. Akan tetapi, massa *absorber* yang besar membuat sistem sangat tidak praktis, terutama jika digunakan pada mesin-mesin industri berdimensi besar. Sehingga diperlukan adanya tambahan peredam agar reduksi getaran dari sistem menjadi efektif saat dioperasikan pada rentang frekuensi operasi yang lebar.

Pada tahun 2017, **Ricky Bramudia Kurniawan** telah melakukan penelitian mengenai “Studi Eksperimen dan Analisa Reduksi Respon Getaran Translasi dan Rotasi menggunakan *Dynamic Vibration Absorber* (DVA) Model *Beam*”. Mekanisme DVA yang digunakan berbentuk *beam* yang ditumpu di tengah dan diberikan massa DVA di ujung *beam* tersebut. Massa di letakkan di kedua ujung sehingga menciptakan 2 sistem *absorber* sekaligus. Pergerakan sistem DVA pada penelitian ini dirancang ke arah translasi dan rotasi saja, karena menggunakan mekanisme *skotch yoke*.

Untuk dapat menganalisa reduksi respon getaran, maka DVA dipasangkan pada sistem utama berupa plat datar bermassa yang ditumpu oleh empat pegas di empat titik. Masa dari sistem utama tersebut akan menerima gaya eksitasi dari pegas dibawahnya yang dihubungkan dengan massa eksentrik pada motor DC. Koefisien pegas yang digunakan untuk menumpu plat datar memiliki dua nilai yang berbeda, sehingga memungkinkan plat untuk bergerak translasi dan rotasi.

Eksperimen dilakukan dengan memvariasikan massa *absorber*, koefisien pegas *absorber*, dan jarak DVA. Massa *absorber* terbuat dari material *steel* yang bernilai 1/10, 1/20, dan 1/30 terhadap massa utama. Sedangkan pegas *absorber* yang digunakan berbahan *stainless steel* dengan variasi perbandingan pegas *absorber* sebesar 1/20, 1/15, dan 1/10.

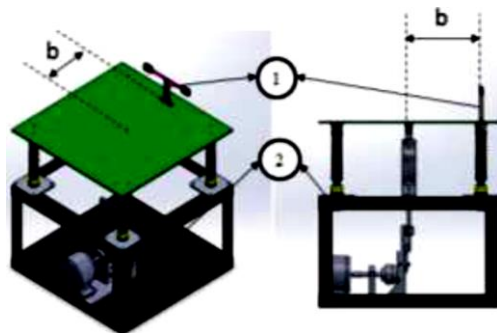
Untuk mempermudah penelitian, koefisien pegas dari *absorber* (k_a) divariasikan dengan merubah panjang *beam* pada DVA. Sedangkan jarak DVA divariasikan pada posisi b_1 , b_2 , dan b_3 .



Gambar 2.15 (a) Rancangan *Assembly DVA* (b) Rancangan Tumpuan DVA [6]

Keterangan:

1. Tumpuan DVA
2. *Beam* (pegas DVA)
3. Massa *absorber*
4. Baut
5. Baut



Gambar 2.16 Mekanisme Gabungan [6]

Keterangan:

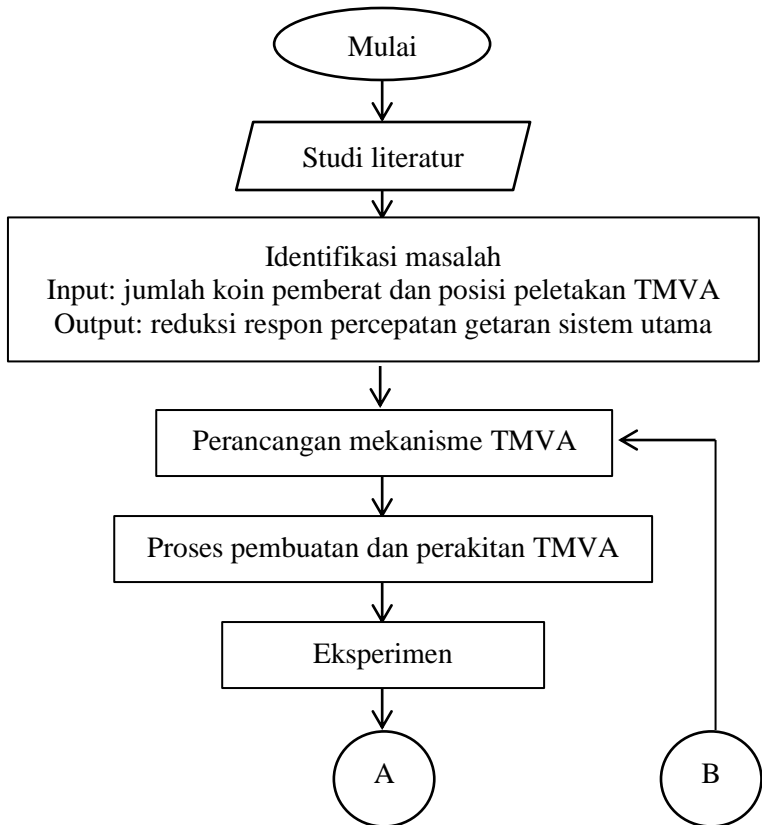
1. DVA
2. Sistem Utama

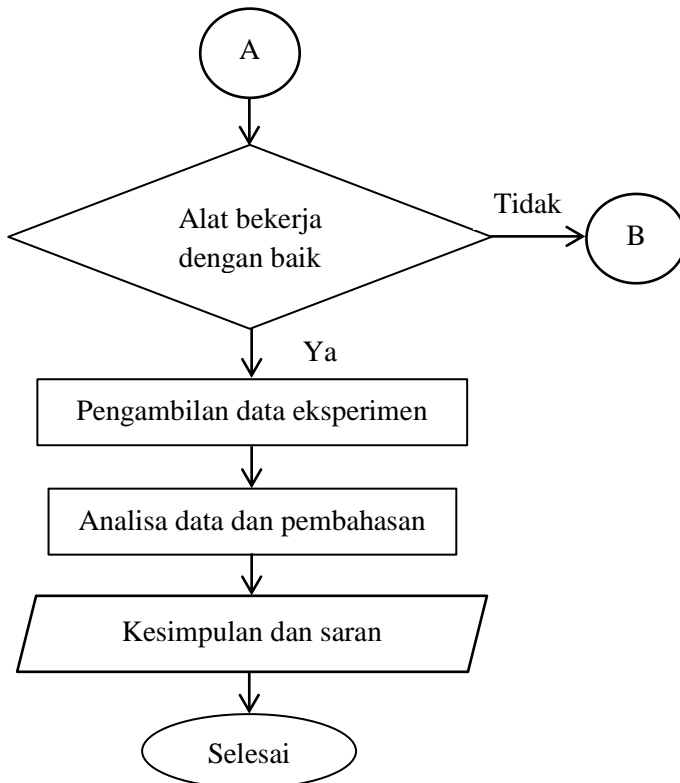
Penelitian dilakukan tanpa menggunakan DVA dan dengan menggunakan DVA. Didapatkan bahwa, semakin besar nilai massa *absorber* maka respon percepatan sistem utama akan semakin kecil. Semakin besar nilai koefisien pegas *absorber* maka respon percepatan sistem utama akan semakin kecil. Semakin jauh jarak peletakan DVA terhadap titik pusat massa sistem utama maka respon percepatan sistem utama akan semakin kecil. Dengan kata lain peredaman ke arah translasi dan rotasi akan semakin baik, demikian sebaliknya.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 *Flowchart* Penelitian

Langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian digambarkan melalui *flowchart* di bawah ini:





Gambar 3.1 *Flowchart Penelitian*

3.2 Penjelasan Tahap Penelitian

3.2.1 Studi Literatur

Sebelum melakukan penelitian, diperlukan studi literatur dan mencari referensi yang terkait dengan teori getaran *multi degree of freedom*, *base motion vibration*, dan *dynamic vibration absorber*. Teori yang didapatkan, bersumber dari buku, tugas akhir, dan jurnal-jurnal internasional.

3.2.2 Identifikasi Masalah

Pada penelitian ini, masalah yang diidentifikasi dibagi menjadi 2, yaitu *input* dan *output*. *Input* yang digunakan mencakup jumlah koin pemberat dan posisi peletakan TMVA. Sedangkan *output*nya berupa reduksi respon getaran sistem utama terhadap variasi jumlah koin dan posisi peletakan TMVA.

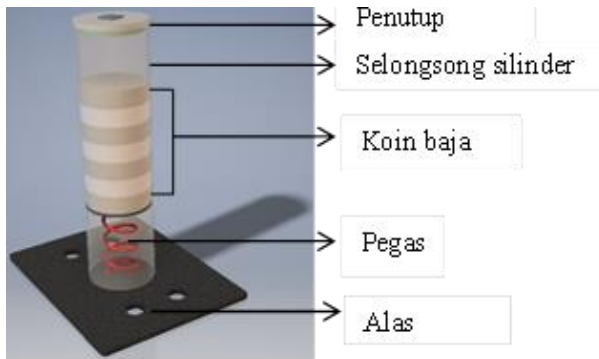
3.2.3 Perancangan Mekanisme TMVA

TMVA (*Translational Mass Vibration Absorber*) merupakan sebuah sistem peredam getaran berbentuk selongsong silinder berisi sebuah pegas baja dan di atasnya tersusun sebuah koin besi yang hanya akan mengalami gerak translasi ke arah vertikal selama bergetar. TMVA tersebut nantinya dipasang di atas sistem utama pada posisi yang mampu menghasilkan redaman optimum. Sistem utama berupa plat datar yang ditopang empat pegas dengan dikenai gaya eksitasi di bawah plat oleh motor DC sebagai sumber getar. Gaya eksitasi di bawah plat dihubungkan dengan massa eksentrik pada motor DC sehingga memberi getaran pada plat secara kontinyu.

Dari penjelasan di atas, dapat diketahui prinsip kerja TMVA yaitu penambahan massa dan pegas pada sistem utama. TMVA akan mereduksi getaran sistem utama dengan menghasilkan getaran yang arahnya berlawanan dengan arah getar sistem utama.

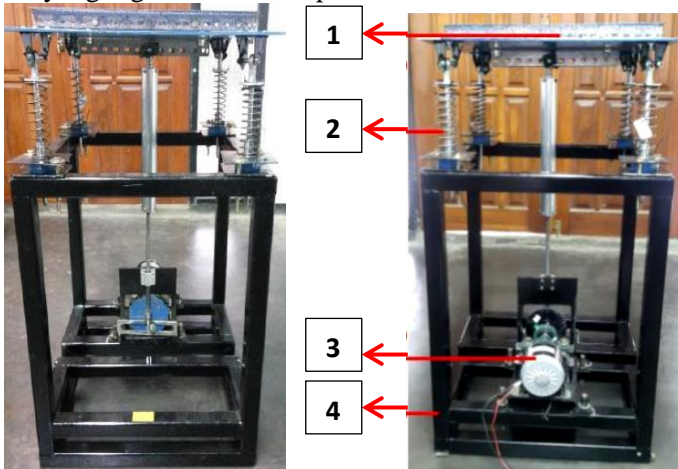
3.2.3.1 Rancangan Penelitian

Rancangan TMVA dapat dilihat pada gambar 3.2 di bawah ini:



Gambar 3.2 Rancangan TMVA

TMVA yang telah dirancang, selanjutnya diletakkan di atas sistem utama. Gambar di bawah merupakan sistem utama yang digunakan dalam penelitian ini.

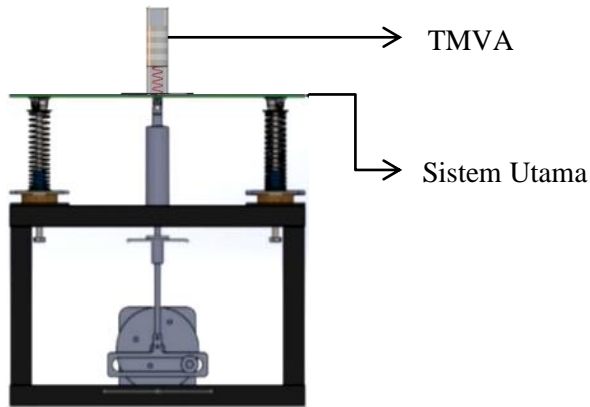


Gambar 3. 3 Sistem Utama[2]

Keterangan:

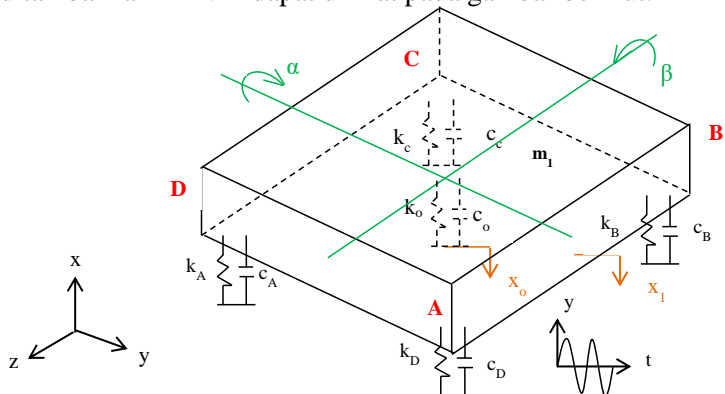
- | | |
|------------------------|----------------------------------|
| 1. Plat <i>exciter</i> | 3. Motor dan mekanisme penggerak |
| 2. Pegas suspensi | 4. <i>Base</i> rangka |

3.2.3.2 Penurunan Persamaan Gerak

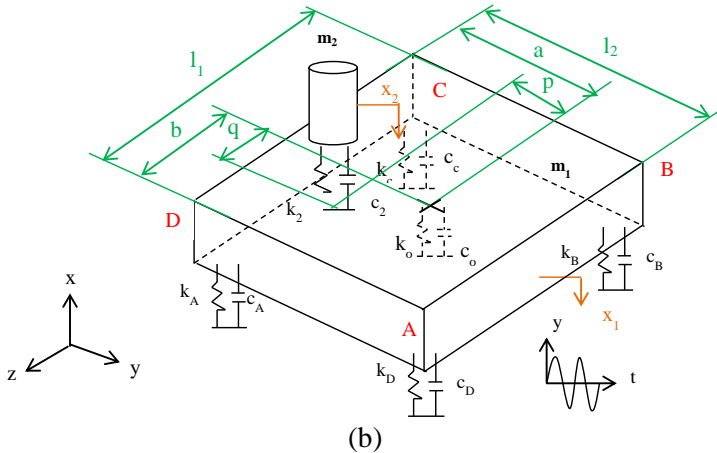


Gambar 3.4 Rancangan Sistem Gabungan

Persamaan gerak didapatkan dari permodelan sistem tanpa dan dengan TMVA yang telah disederhanakan. Pemodelan yang disederhanakan untuk analisa model dinamis dari sistem utama tanpa TMVA dan sistem utama yang ditambahkan TMVA dapat dilihat pada gambar berikut:



(a)



Gambar 3.5 Skema Sistem Utama (a) Tanpa TMVA dan (b) Ditambahkan TMVA

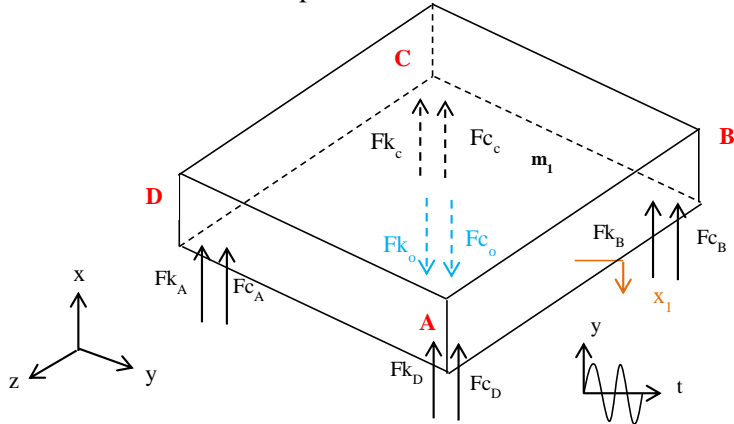
Keterangan:

- m_1 : massa utama
- m_2 : massa TMVA
- x_0 : *displacement* eksitasi disk
- x_1 : *displacement* massa utama (m_1)
- x_2 : *displacement* massa TMVA (m_2)
- k_0 : konstanta pegas eksitasi
- k_2 : konstanta pegas m_2
- k_i : konstanta pegas m_1 pada titik i
- c_0 : konstanta redaman eksitasi
- c_i : konstanta redaman m_1 pada titik i
- c_2 : konstanta redaman m_2
- i : A, B, C, atau D
- p : jarak titik pusat TMVA terhadap titik pusat massa utama dalam sumbu y
- q : jarak titik pusat TMVA terhadap titik pusat massa utama dalam sumbu z

- $a = l_2 / 2$
 $b = l_1 / 2$
 α : sudut putar bidang dalam sumbu y
 β : sudut putar bidang dalam sumbu z

Free body diagram sistem utama tanpa TMVA dapat dilihat pada gambar 3.7, sedangkan gambar 3.10 untuk sistem utama yang telah ditambahkan TMVA. Selanjutnya, gambar-gambar tersebut diturunkan ke dalam persamaan gerak berikut ini:

a. Sistem Utama tanpa TMVA



Gambar 3.6 *Free Body* Diagram Sistem Utama tanpa TMVA

Keterangan:

- Fk_o : Gaya eksitasi pegas dari motor penggerak (N)
 Fc_o : Gaya eksitasi redaman dari motor penggerak (N)
 Fk_i : Gaya pegas dari massa utama (m_1) pada titik i (N)
 i : A, B, C, atau D
 Fc_i : Gaya redaman dari massa utama (m_1) pada titik i (N)

Dimana besarnya masing-masing gaya yaitu:

$$\begin{aligned}
 Fk_o &= k_o(x_1 - x_o) & Fk_c &= k_c(x_1 + b \alpha + a\beta) \\
 Fc_o &= c_o(\dot{x}_1 - \dot{x}_o) & Fc_c &= c_c(\dot{x}_1 + b \dot{\alpha} + a\dot{\beta}) \\
 Fk_A &= k_A(x_1 - b\alpha - a\beta) & Fk_D &= k_D(x_1 - b\alpha + a\beta) \\
 Fc_A &= c_A(\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} - a\dot{\beta}) & Fc_D &= c_D(\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} + a\dot{\beta}) \\
 Fk_B &= k_B(x_1 + b \alpha - a\beta) & Fc_B &= c_B(\dot{x}_1 + b \dot{\alpha} - a\dot{\beta})
 \end{aligned}$$

Massa utama pada sistem tanpa TMVA menerima gaya eksitasi oleh k_o , k_A , k_B , k_C , k_D , c_o , c_A , c_B , c_C , dan c_D . Sistem utama memiliki 3 arah pergerakan, yaitu translasi, *rolling*, dan *pitching*. Setiap arah pergerakan yang berbeda memiliki 1 DOF, sehingga sistem tersebut memiliki 3 DOF (*degree of freedom*). Berikut ini dijabarkan persamaan gerak dari massa utama (m_1):

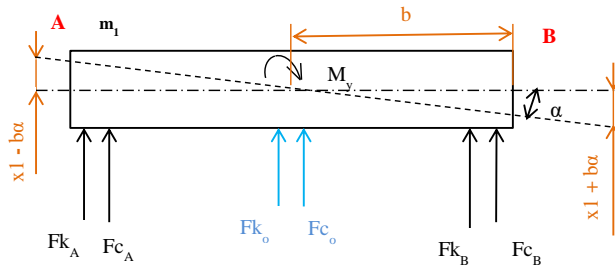
✓ Arah Pergerakan Translasi

Translasi merupakan pergerakan massa ke arah vertikal searah sumbu x.

$$\begin{aligned}
 +\downarrow \sum Fx_1 &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 Fk_o + Fc_o - Fk_A - Fc_A - Fk_B - Fc_B - Fk_c - Fc_c - Fk_D - Fc_D &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 k_o(x_1 - x_o) + c_o(\dot{x}_1 - \dot{x}_o) - k_A(x_1 - b\alpha - a\beta) - & \\
 c_A(\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} - a\dot{\beta}) - k_B(x_1 + b \alpha - a\beta) - c_B(\dot{x}_1 + b \dot{\alpha} - & \\
 a\dot{\beta}) - k_c(x_1 + b \alpha + a\beta) - c_c(\dot{x}_1 + b \dot{\alpha} + a\dot{\beta}) - & \\
 k_D(x_1 - b\alpha + a\beta) - c_D(\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} + a\dot{\beta}) &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 m_1 \ddot{x}_1 + (k_A + k_B + k_C + k_D - k_o)x_1 - (k_A b - k_B b - k_C b + & \\
 k_D b) \alpha - (k_A a + k_B a - k_C a - k_D a) \beta + (c_A + c_B + c_C + & \\
 c_D - c_o) \dot{x}_1 - (c_A b - c_B b - c_C b + c_D b) \dot{\alpha} - (c_A a + c_B a - & \\
 c_C a - c_D a) \dot{\beta} &= -k_o x_o - c_o \dot{x}_o \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

✓ Arah Pergerakan *Rolling*

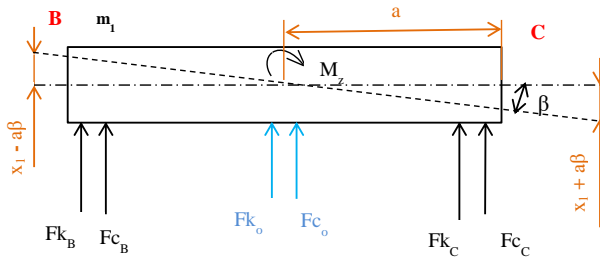
Gerak rotasi massa pada sumbu y yang ditinjau dari tampak depan sistem disebut dengan *rolling*. Gambar 3.8 adalah *free body* diagram gerak *rolling* dari massa utama.



Gambar 3.7 Free Body Diagram Gerak Rolling oleh Massa Utama

$$\begin{aligned}
 & M_y \overset{\curvearrowright}{+} y \ddot{\alpha} \\
 & Fk_A b + Fc_A b - Fk_B b - Fc_B b - Fk_C b - Fc_C b + \\
 & Fk_D b + Fc_D b = J_y \ddot{\alpha} \\
 & k_A(x_1 - b\alpha - a\beta)b + c_A(\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} - a\dot{\beta})b - \\
 & k_B(x_1 + b\alpha - a\beta)b - c_B(\dot{x}_1 + b\dot{\alpha} - a\dot{\beta})b - \\
 & k_C(x_1 + b\alpha + a\beta)b - c_C(\dot{x}_1 + b\dot{\alpha} + a\dot{\beta})b + \\
 & k_D(x_1 - b\alpha + a\beta)b + c_D(\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} + a\dot{\beta})b = J_y \ddot{\alpha} \\
 & J_y \ddot{\alpha} - (k_A b - k_B b - k_C b + k_D b)x_1 + (k_A b^2 + k_B b^2 + \\
 & k_C b^2 + k_D b^2) \alpha + (k_A a b - k_B a b + k_C a b - k_D a b) \beta - \\
 & (c_A b - c_B b - c_C b + c_D b) \dot{x}_1 + (c_A b^2 + c_B b^2 + c_C b^2 + \\
 & c_D b^2) \dot{\alpha} + (c_A a b - c_B a b + c_C a b - c_D a b) \dot{\beta} = 0 \quad (3.2)
 \end{aligned}$$

- ✓ Arah Pergerakan *Pitching*
Pitching merupakan gerak rotasi massa pada sumbu z yang ditinjau dari tampak samping sistem. Berikut merupakan *free body diagram* gerak *pitching* massa utama:



Gambar 3.8 Free Body Diagram Gerak Pitching oleh Massa Utama

$$\begin{aligned}
 \curvearrowright_+ M_z &= J_z \ddot{\beta} \\
 F_{k_A}a + F_{c_A}a + F_{k_B}a + F_{c_B}a - F_{k_C}a - F_{c_C}a - \\
 F_{k_D}a - F_{c_D}a &= J_z \ddot{\beta} \\
 k_A(x_1 - b\alpha - a\beta)a + c_A(\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} - a\dot{\beta})a + \\
 k_B(x_1 + b\alpha - a\beta)a + c_B(\dot{x}_1 + b\dot{\alpha} - a\dot{\beta})a - \\
 k_C(x_1 + b\alpha + a\beta)a - c_C(\dot{x}_1 + b\dot{\alpha} + a\dot{\beta})a - \\
 k_D(x_1 - b\alpha + a\beta)a - c_D(\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} + a\dot{\beta})a &= J_z \ddot{\beta} \\
 J_z \ddot{\beta} - (k_Aa + k_Ba - k_Ca - k_Da)x_1 + (k_Aab - k_Bab + \\
 k_Cab - k_Dab)\alpha + (k_Aa^2 + k_Ba^2 + k_Ca^2 + k_Da^2)\beta - \\
 (c_Aa + c_Ba - c_Ca - c_Da)\dot{x}_1 + (c_Aab - c_Bab + c_Cab - \\
 c_Dab)\dot{\alpha} + (c_Aa^2 + c_Ba^2 + c_Ca^2 + c_Da^2)\dot{\beta} &= 0 \quad (3.3)
 \end{aligned}$$

Dimana :

J_y : Momen inersia massa utama pada sumbu y

J_z : Momen inersia massa utama pada sumbu z

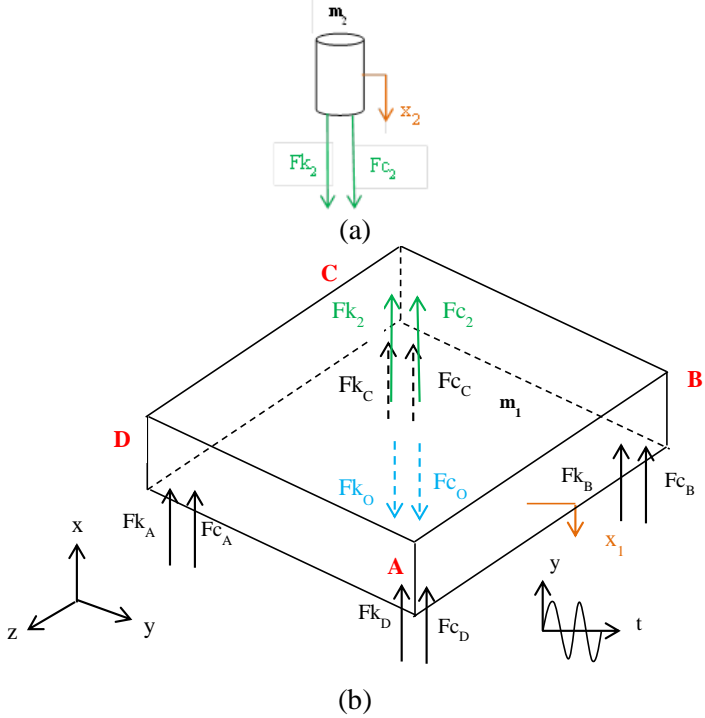
$$J_y = J_z = \frac{1}{12}m_1(l_1^2 + t^2)$$

$$\begin{aligned}
 J_y = J_z &= \frac{1}{12} \times 6,7 \text{ kg} \times (0,5^2 + 0,006^2) \text{ m}^2 \\
 &= 0,1396 \text{ kg} \cdot \text{m}^2
 \end{aligned}$$

Persamaan (3.1), (3.2), dan (3.3) di atas, dapat digabungkan ke dalam suatu matriks 3x3, sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{\alpha} \\ \ddot{\beta} \end{Bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} (c_A + c_B + c_C + c_D - c_o) & -(c_A - c_B - c_C + c_D)b & -(c_A + c_B - c_C - c_D)a \\ -(c_A - c_B - c_C + c_D)b & (c_A + c_B + c_C + c_D)b^2 & (c_A - c_B + c_C - c_D)ab \\ -(c_A + c_B - c_C - c_D)a & (c_A - c_B + c_C - c_D)ab & (c_A + c_B + c_C + c_D)a^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\alpha} \\ \dot{\beta} \end{Bmatrix} \\
 & + \begin{bmatrix} (k_A + k_B + k_C + k_D - k_o) & -(k_A - k_B - k_C + k_D)b & -(k_A + k_B - k_C - k_D)a \\ -(k_A - k_B - k_C + k_D)b & (k_A + k_B + k_C + k_D)b^2 & (k_A - k_B + k_C - k_D)ab \\ -(k_A + k_B - k_C - k_D)a & (k_A - k_B + k_C - k_D)ab & (k_A + k_B + k_C + k_D)a^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \alpha \\ \beta \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -k_o x_o - c_o \dot{x}_o \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.4)
 \end{aligned}$$

b. Sistem Utama dengan TMVA



Gambar 3.9 Free Body Diagram (a) TMVA dan (b) Sistem Utama

Keterangan:

$$\begin{aligned}
 Fk_o &= k_o(x_1 - x_o) & Fk_c &= k_c(x_1 + b \alpha + a\beta) \\
 Fc_o &= c_o(\dot{x}_1 - \dot{x}_o) & Fc_c &= c_c(\dot{x}_1 + b \dot{\alpha} + a\dot{\beta}) \\
 Fk_A &= k_A(x_1 - b\alpha - a\beta) & Fk_D &= k_D(x_1 - b\alpha + a\beta) \\
 Fc_A &= c_A(\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} - a\dot{\beta}) & Fc_D &= c_D(\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} + a\dot{\beta}) \\
 Fk_B &= k_B(x_1 + b \alpha - a\beta) & Fk_2 &= k_2(x_1 + q \alpha - p\beta - x_2) \\
 Fc_B &= c_B(\dot{x}_1 + b \dot{\alpha} - a\dot{\beta}) & Fc_2 &= c_2(\dot{x}_1 + q \dot{\alpha} - p\dot{\beta} - \dot{x}_2)
 \end{aligned}$$

Massa utama pada sistem yang ditambahkan TMVA menerima gaya eksitasi oleh k_o , k_A , k_B , k_C , k_D , k_2 , c_o , c_A , c_B , c_C , c_D , dan c_2 . Pada sistem gabungan ini, terjadi 4 arah pergerakan, yaitu 3 arah pergerakan sistem utama dan 1 arah pergerakan TMVA. Seperti yang telah dibahas sebelumnya, bahwa sistem utama mengalami pergerakan translasi, rolling, dan *pitching*. Sedangkan TMVA hanya mengalami gerak translasi. Setiap arah pergerakan yang berbeda memiliki 1 DOF, sehingga sistem tersebut memiliki 4 DOF (*degree of freedom*). Berikut ini dijabarkan persamaan gerak dari massa utama (m_1) dan massa *absorber* (m_2):

✓ Arah Pergerakan Translasi m_1

$$\begin{aligned}
 + \downarrow \sum Fx_1 &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 Fk_o + Fc_o - Fk_A - Fc_A - Fk_B - Fc_B - Fk_c - Fc_c - \\
 Fk_D - Fc_D - Fk_2 - Fc_2 &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 k_o(x_1 - x_o) + c_o(\dot{x}_1 - \dot{x}_o) - k_A(x_1 - b\alpha - a\beta) - \\
 c_A(\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} - a\dot{\beta}) - k_B(x_1 + b \alpha - a\beta) - \\
 c_B(\dot{x}_1 + b \dot{\alpha} - a\dot{\beta}) - k_c(x_1 + b \alpha + a\beta) - \\
 c_c(\dot{x}_1 + b \dot{\alpha} + a\dot{\beta}) - k_D(x_1 - b\alpha + a\beta) - \\
 c_D(\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} + a\dot{\beta}) - k_2(x_1 + q \alpha - p\beta - x_2) - \\
 c_2(\dot{x}_1 + q \dot{\alpha} - p\dot{\beta} - \dot{x}_2) &= m_1 \ddot{x}_1 \\
 m_1 \ddot{x}_1 + (k_A + k_B + k_C + k_D + k_2 - k_o)x_1 - \\
 (k_A b - k_B b - k_C b + k_D b - k_2 q) \alpha - (k_A a + k_B a -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& k_C a - k_D a + k_2 p) \beta - k_2 x_2 + (c_A + c_B + c_C + c_D + \\
& c_2 - c_0) \dot{x}_1 - (c_A b - c_B b - c_C b + c_D b - c_2 q) \dot{\alpha} - \\
& (c_A a + c_B a - c_C a - c_D a + c_2 p) \dot{\beta} - c_2 \dot{x}_2 = -k_0 x_0 - \\
& c_0 \dot{x}_0 \quad (3.5)
\end{aligned}$$

✓ Arah Pergerakan *Rolling* m_1

$$\begin{aligned}
& \overset{\curvearrowright}{+} M_y = J_y \ddot{\alpha} \\
& Fk_A b + Fc_A b - Fk_B b - Fc_B b - Fk_C b - Fc_C b + \\
& Fk_D b + Fc_D b - Fk_2 q - Fc_2 q = J_y \ddot{\alpha} \\
& k_A (x_1 - b\alpha - a\beta) b + c_A (\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} - a\dot{\beta}) b - \\
& k_B (x_1 + b\alpha - a\beta) b - c_B (\dot{x}_1 + b\dot{\alpha} - a\dot{\beta}) b - \\
& k_C (x_1 + b\alpha + a\beta) b - c_C (\dot{x}_1 + b\dot{\alpha} + a\dot{\beta}) b + \\
& k_D (x_1 - b\alpha + a\beta) b + c_D (\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} + a\dot{\beta}) b - \\
& k_2 (x_1 + q\alpha - p\beta - x_2) q - c_2 (\dot{x}_1 + q\dot{\alpha} - p\dot{\beta} - \dot{x}_2) q = \\
& J_y \ddot{\alpha} \\
& J_y \ddot{\alpha} - (k_A b - k_B b - k_C b + k_D b - k_2 q) x_1 + \\
& (k_A b^2 + k_B b^2 + k_C b^2 + k_D b^2 + k_2 q^2) \alpha + (k_A ab - \\
& k_B ab + k_C ab - k_D ab - k_2 pq) \beta - k_2 q x_2 - \\
& (c_A b - c_B b - c_C b + c_D b - c_2 q) \dot{x}_1 + (c_A b^2 + c_B b^2 + \\
& c_C b^2 + c_D b^2 + c_2 q^2) \dot{\alpha} + (c_A ab - c_B ab + c_C ab - \\
& c_D ab - c_2 pq) \dot{\beta} - c_2 q \dot{x}_2 = 0 \quad (3.6)
\end{aligned}$$

✓ Arah Pergerakan *Pitching* m_1

$$\begin{aligned}
& \overset{\curvearrowright}{+} M_z = J_z \ddot{\beta} \\
& Fk_A a + Fc_A a + Fk_B a + Fc_B a - Fk_C a - Fc_C a - \\
& Fk_D a - Fc_D a + Fk_2 p + Fc_2 p = J_z \ddot{\beta} \\
& k_A (x_1 - b\alpha - a\beta) a + c_A (\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} - a\dot{\beta}) a + \\
& k_B (x_1 + b\alpha - a\beta) a + c_B (\dot{x}_1 + b\dot{\alpha} - a\dot{\beta}) a - \\
& k_C (x_1 + b\alpha + a\beta) a - c_C (\dot{x}_1 + b\dot{\alpha} + a\dot{\beta}) a - \\
& k_D (x_1 - b\alpha + a\beta) a - c_D (\dot{x}_1 - b\dot{\alpha} + a\dot{\beta}) a +
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& k_2(x_1 + q \propto -p\beta - x_2)p + c_2(\dot{x}_1 + q \propto -p\dot{\beta} - \dot{x}_2)p = \\
& J_z \ddot{\beta} \\
& J_z \ddot{\beta} - (k_A a + k_B a - k_C a - k_D a + k_2 p)x_1 + \\
& (k_A ab - k_B ab + k_C ab - k_D ab - k_2 pq) \propto + (k_A a^2 + \\
& k_B a^2 + k_C a^2 + k_D a^2 + k_2 p^2)\beta + k_2 p x_2 - \\
& (c_A a + c_B a - c_C a - c_D a + c_2 p)\dot{x}_1 + (c_A ab - c_B ab + \\
& c_C ab - c_D ab - c_2 pq)\dot{\propto} + (c_A a^2 + c_B a^2 + c_C a^2 + \\
& c_D a^2 + c_2 p^2)\dot{\beta} + c_2 p \dot{x}_2 = 0 \quad (3.7)
\end{aligned}$$

✓ Arah Pergerakan Translasi m_2

$$\begin{aligned}
& + \downarrow \sum F x_2 = m_2 \ddot{x}_2 \\
& F k_2 + F c_2 = m_2 \ddot{x}_2 \\
& k_2(x_1 + q \propto -p\beta - x_2) + c_2(\dot{x}_1 + q \propto -p\dot{\beta} - \dot{x}_2) = \\
& m_2 \ddot{x}_2 \\
& m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_1 - k_2 q \propto + k_2 p \beta + k_2 x_2 - c_2 \dot{x}_1 - c_2 q \dot{\propto} + \\
& c_2 p \dot{\beta} + c_2 \dot{x}_2 = 0 \quad (3.8)
\end{aligned}$$

Persamaan (3.5) sampai dengan (3.8) dapat digabungkan ke dalam suatu matriks 4 x 4, sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & J_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{\propto} \\ \ddot{\beta} \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} (c_A a + c_B a - c_C a - c_D a + c_2 p) & -(c_A b - c_B b - c_C b + c_D b - c_2 q) & -(c_A a + c_B a - c_C a - c_D a + c_2 p) & -c_2 \\ -(c_A b - c_B b - c_C b + c_D b - c_2 q) & (c_A b^2 + c_B b^2 + c_C b^2 + c_D b^2 + c_2 q^2) & (c_A ab - c_B ab + c_C ab - c_D ab - c_2 pq) & -c_2 q \\ -(c_A a + c_B a - c_C a - c_D a + c_2 p) & (c_A ab - c_B ab + c_C ab - c_D ab - c_2 pq) & (c_A a^2 + c_B a^2 + c_C a^2 + c_D a^2 + c_2 p^2) & c_2 p \\ -c_2 & -c_2 q & c_2 p & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\propto} \\ \dot{\beta} \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} \\
& + \begin{bmatrix} (k_A + k_B + k_C + k_D + k_2 - k_o) & -(k_A b - k_B b - k_C b + k_D b - k_2 q) & -(k_A a + k_B a - k_C a - k_D a + k_2 p) & -k_2 \\ -(k_A b - k_B b - k_C b + k_D b - k_2 q) & (k_A b^2 + k_B b^2 + k_C b^2 + k_D b^2 + k_2 q^2) & (k_A ab - k_B ab + k_C ab - k_D ab - k_2 pq) & -k_2 q \\ -(k_A a + k_B a - k_C a - k_D a + k_2 p) & (k_A ab - k_B ab + k_C ab - k_D ab - k_2 pq) & (k_A a^2 + k_B a^2 + k_C a^2 + k_D a^2 + k_2 p^2) & k_2 p \\ -k_2 & -k_2 q & k_2 p & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ \propto \\ \beta \\ x_2 \end{Bmatrix} \\
& \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{\propto} \\ \dot{\beta} \\ \dot{x}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -k_o x_o - c_o \dot{x}_o \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (3.9)
\end{aligned}$$

3.2.3.1 Parameter Penelitian

Parameter penelitian digunakan untuk merancang bangun komponen-komponen TMVA. Parameter ini meliputi jumlah koin, posisi TMVA, konstanta *damping*, dan frekuensi operasi.

a. Jumlah Koin pada TMVA

Massa TMVA yang digunakan berupa sejumlah koin yang disusun secara vertikal di dalam selongsong. Penambahan dan pengurangan jumlah koin, akan mempengaruhi massa TMVA. Dalam penelitian ini akan digunakan 3 variasi jumlah koin TMVA dengan mempertimbangkan nilai rasio massa TMVA terhadap massa utama (m_2/m_1) optimum yaitu 1/20, berdasarkan referensi [9] dan pustaka penelitian terdahulu [6] dan [1].

Tabel 3.1 Massa Utama

No.	Komponen	Massa
1.	Plat <i>exciter</i>	5,9 kg
2.	<i>Spring rod</i> suspensi	0,6 kg
3.	Poros penggerak	0,2 kg
TOTAL		6,7 kg

Dengan diketahuinya total massa utama sebesar 6,7 kg, maka dapat diketahui massa TMVA (m_{22}) berdasarkan rasio massa optimum, yaitu:

$$\begin{aligned}
 m_{22} &= \frac{1}{20} m_1 \\
 &= \frac{1}{20} \times 6,7 \text{ kg} \\
 &= 0,335 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Jika diinginkan m_{22} di atas terdiri dari 4 koin, maka massa untuk tiap koinnya yaitu:

$$m_{koin} = \frac{0,335 \text{ kg}}{4} = 0,08375 \text{ kg}$$

Dalam penelitian ini, ingin diketahui pengaruh respon getaran dengan menggunakan jumlah koin di atas dan di bawah batas optimum rasio massa. Sehingga ditentukan rasio massa TMVA terhadap sistem utama yaitu 1/40, 2/40, dan

3/40. Berikut ini perhitungan untuk mengetahui massa TMVA dan jumlah koin berdasarkan variasi rasio:

→ Pengujian untuk $r_{21} = 1/40$:

$$r_{21} = \frac{m_{21}}{m_1}$$

$$\frac{1}{40} = \frac{m_{21}}{6,7 \text{ kg}}$$

$$m_{21} = 0,1675 \text{ kg}$$

$$\text{Jumlah koin} = \frac{m_{21}}{m_{\text{koin}}} = \frac{0,1675 \text{ kg}}{0,08375 \text{ kg}} = 2 \text{ buah koin}$$

→ Pengujian untuk 6 buah koin:

$$r_{23} = \frac{m_{23}}{m_1}$$

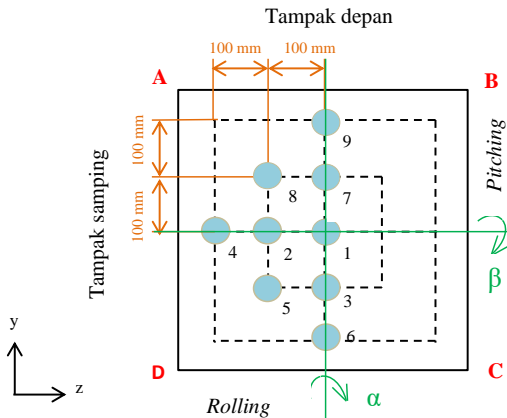
$$\frac{3}{40} = \frac{m_{23}}{6,7 \text{ kg}}$$

$$m_{23} = 0,5025 \text{ kg}$$

$$\text{Jumlah koin} = \frac{m_{23}}{m_{\text{koin}}} = \frac{0,5025 \text{ kg}}{0,08375 \text{ kg}} = 6 \text{ buah koin}$$

b. Posisi TMVA

Dalam melakukan eksperimen, TMVA akan diletakkan di atas plat *exciter* pada sistem utama. Plat *exciter* yang digunakan terbuat dari material aluminium dengan panjang (p) x lebar (l) x tinggi (t) yaitu 500 mm x 500 mm x 6 mm. Nantinya, TMVA akan diposisikan pada sembilan titik yang berbeda. Untuk memudahkan penelitian, maka kesembilan variasi posisi tersebut diwakilkan ke dalam *node* 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 seperti dibawah ini:



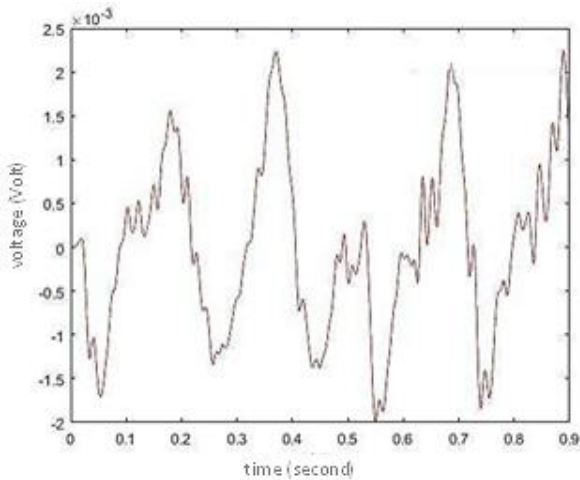
Gambar 3.10 Skema Posisi Peletakan TMVA Dilihat dari Tampak Atas

Dengan dimensi plat *exciter* yang telah diketahui di atas, maka dapat diketahui koordinat (z ; y) keenam *node* tersebut ditinjau dari titik pusatnya. *Node* 1 berada pada koordinat (0 ; 0) mm, *node* 2 (-100 ; 0) mm, *node* 3 (0 ; -100) mm, *node* 4 (-200 ; 0), *node* 5 (-100 ; -100), *node* 6 (0 ; -200), *node* 7 (0, 100), *node* 8 (100, 100), dan *node* 9 yaitu (0, 200).

c. **Konstanta *Damping***

Nilai konstanta *damping* didapatkan dari perhitungan hasil uji *damping* dengan cara pemasangan beban menggantung pada ujung pegas, sehingga pegas akan mengalami osilasi. Selanjutnya, *probe* dipasang pada beban sehingga respon getaran yang terjadi akan terbaca pada layar *oscilloscope*. Di bawah ini merupakan contoh perhitungan untuk mendapatkan nilai konstanta *damping* dari TMVA (c_2).

Data yang didapat dari hasil percobaan diolah di *software* matlab untuk mendapatkan grafik hasil *filter* dan *smoothing*, sebagai berikut:



Gambar 3. 11 Grafik Hasil *Filter* dan *Smoothing* untuk Pegas TMVA

Dari grafik di atas, akan diambil 2 puncak dan 2 lembah berdekatan yang sesuai dengan pola penurunan grafik untuk dijadikan sampel perhitungan berikutnya. Dalam perhitungan ini dipilih puncak 2 dan 3 dari sisi kiri dengan nilai puncak 2 yaitu 0,0023 dan lembahnya 0,0014, serta puncak 3 bernilai 0,002 dengan lembahnya 0,0018. Nilai amplitudo dari sampel tersebut diolah kedalam rumus berikut untuk mendapatkan nilai konstanta *damping* (c).

$$c = 2. m \sqrt{\frac{k}{m}} \sqrt{\frac{1}{\left[\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{x_n}{x_{n+1}}\right)} \right]^2 + 1}} \quad (3.10)$$

Dimana :

c : konstanta *damping*

m : massa beban

X_n : rata-rata amplitudo puncak n dengan lembah terdekat

X_{n+1} : rata-rata amplitudo puncak $n + 1$ dengan lembah terdekat

n : jumlah gelombang yang dianalisa

$$X_2 = \frac{0,0023 + 0,0014}{2} = 0,00185$$

$$X_{n+1} = \frac{0,002 + 0,0018}{2} = 0,0019$$

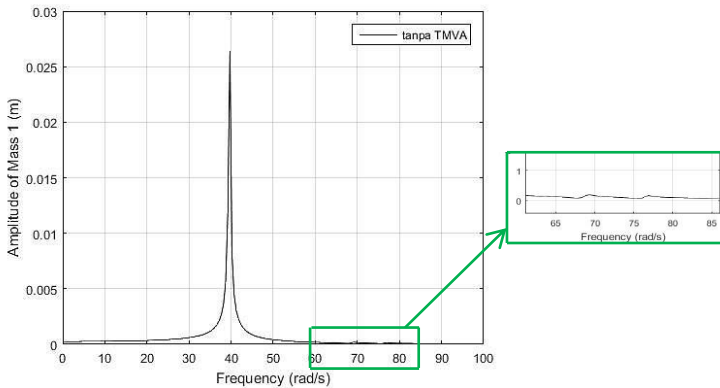
$$c = 2 \times 2 \text{ kg} \sqrt{\frac{583,6 \text{ N/m}}{2 \text{ kg}}} \sqrt{\frac{1}{\left[\frac{2\pi}{\ln\left(\frac{0,00185}{0,0019}\right)} \right]^2 + 1}}$$

$$c = 0,29 \text{ Ns/m}$$

d. Fekuenasi Operasi (ω_f)

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui respon redaman sistem utama pada kondisi resonansi. Dimana efek resonansi terjadi ketika nilai besarnya frekuensi operasi motor sama dengan frekuensi natural sistem itu sendiri. Frekuensi natural diperoleh dari persamaan berikut ini:

$$\omega_f = \omega_n = \sqrt{\frac{k_{eq}}{m_{eq}}} \quad (3.11)$$



Gambar 3. 12 Bode Diagram Sistem 3 DOF

Dimana nilai frekuensi natural untuk sistem utama 3 DOF yaitu:

$$\omega_{n1} = 39,5954 \text{ rad/s} = 6,302 \text{ Hz}$$

$$\omega_{n2} = 68,8749 \text{ rad/s} = 10,9618 \text{ Hz}$$

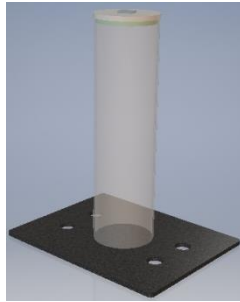
$$\omega_{n3} = 76,5577 \text{ rad/s} = 12,1845 \text{ Hz}$$

Gambar di atas menunjukkan bahwa amplitudo respon getaran terbesar terdapat pada frekuensi natural pertama, sedangkan puncak ke-2 terlihat menurun. Oleh sebab itu, pada penelitian ini, akan didesain sebuah TMVA yang dapat mereduksi getaran pada frekuensi natural pertama.

3.2.4 Rancang Bangun TMVA

Berikut ini komponen TMVA beserta material penyusunnya, yaitu:

1. *Body* Luar

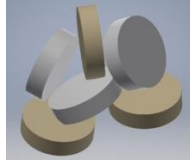


Gambar 3.13 Desain *Body* Luar TMVA

Body luar penyusun TMVA terdiri dari alas persegi dengan ukuran 100 mm x 110 mm, selongsong silinder berdiameter dalam 45 mm sepanjang 190 mm dan penutupnya. Alas TMVA dan selongsongnya terbuat dari akrilik bermassa jenis $1,18 \text{ g/cm}^3$ dengan ketebalan 3 mm untuk alas, dan 2 mm untuk selongsong. Penutup selongsong terbuat dari akrilik dengan tebal 2 mm dengan plat besi tipis bermassa jenis 7.800 kg/m^3 berukuran 20 mm x 20 mm yang ditempelkan pada bagian atas tengah tutup. Plat besi tersebut berguna sebagai tempat pemasangan *probe*, dimana nantinya *probe* akan digunakan sebagai sensor pendeteksi respon percepatan getaran.

2. Massa TMVA

Massa TMVA direncanakan berbentuk koin yang terbuat dari material besi dengan massa jenis 6.800 kg/m^3 . Koin-koin tersebut nantinya akan ditumpuk secara vertikal didalam selongsong silinder. Jumlah tumpukan koin akan divariasikan untuk 3 kali percobaan dengan nilai 2, 4, dan 6 buah. Jadi untuk dapat melakukan eksperimen ini, dibutuhkan setidaknya 6 buah koin baja.

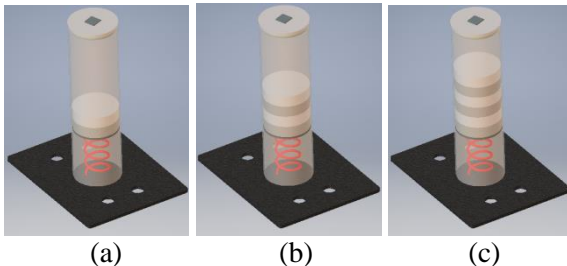


Gambar 3. 14 Enam Buah Koin yang Digunakan sebagai Massa TMVA

Pada penjelasan sebelumnya, telah diketahui nilai massa utama sebesar 6,7 kg. Dalam rancang bangun TMVA, diinginkan diameter koin yang digunakan sebesar 44 mm dengan massa dan tinggi masing-masing bernilai sama. Sehingga untuk mendapatkan tinggi sebuah koin baja, dapat dicari melalui contoh perhitungan berikut:

→ Percobaan 1 (2 tumpukan koin)

$$\begin{aligned}
 m_{\text{koin}} &= 0,08375 \text{ kg} \\
 \rho &= 6.800 \text{ kg/m}^3 \\
 V &= \frac{m_{21}}{\rho} & (3.12) \\
 A \times t &= \frac{0,08375 \text{ kg}}{6.800 \text{ kg/m}^3}, \text{ dimana } A = \pi \times r^2 \\
 t &= \frac{1,2316 \times 10^{-5}}{3,14 \times (0,022)^2} \\
 t &= 8,104 \times 10^{-3} \text{ m} = 8,104 \text{ mm/koin}
 \end{aligned}$$



Gambar 3. 15 Variasi Jumlah Koin pada (a) Percobaan 1, (b) Percobaan 2, dan (c) Percobaan 3

3. Pegas TMVA

Pegas TMVA akan dibuat dari material baja dengan massa jenis 7.850 kg/m^3 . Berdasarkan teori tentang *vibration absorber* dalam buku “*Mechanical Vibration*” karangan S. Rao dan penelitian-penelitian terdahulu, diperoleh rasio perbandingan optimal dari pegas absorber terhadap pegas total sistem utama sebagai berikut:

$$k_2 = \frac{1}{20} k_{total} \quad (3.13)$$

Dimana nilai k_A , k_B , k_C , dan k_D pada sistem utama yaitu:

$$\begin{aligned} k_A &= 1.896 \text{ N/m} & k_C &= 3.311 \text{ N/m} \\ k_B &= 2.510 \text{ N/m} & k_D &= 3.955 \text{ N/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} k_{total} &= k_A + k_B + k_C + k_D \\ &= (1896 + 2510 + 3311 + 3955) \text{ N/m} \\ &= 11672 \text{ N/m} \\ k_2 &= \frac{1}{20} (11672 \frac{\text{N}}{\text{m}}) \\ &= \mathbf{583,6 \text{ N/m}} \end{aligned}$$

Panjang, diameter, dan jumlah lilitan pegas yang dipesan, disesuaikan dengan hasil perhitungan berdasarkan referensi [3]. Dimana diketahui bahwa,

$$G \text{ (shear modulus) baja} = 12 \times 10^6 \text{ psi}$$

$$k_2 = 583, \text{ N/m} = 3,332 \text{ lbf/in}$$

$$P \text{ (load)} = 0,335 \text{ kg} = 0,7385 \text{ lb}$$

Jika diinginkan sebuah pegas dengan spesifikasi berikut:

$$D \text{ (diameter kawat)} = 2 \text{ mm} = 0,0787 \text{ in}$$

$$do \text{ (diameter luar pegas)} = 40 \text{ mm}$$

$$di \text{ (diameter dalam pegas)} = 36 \text{ mm}$$

maka

$$\begin{aligned} R \text{ (jari-jari relatif)} &= (r_o + r_i) / 2 \\ &= (20 \text{ mm} + 18 \text{ mm}) / 2 \\ &= 19 \text{ mm} = 0,7486 \text{ in} \end{aligned}$$

$$L = 2\pi R N a \quad \text{atau} \quad N a = \frac{L}{2\pi R} \quad (3.14)$$

$$k = \frac{G D^4}{64 N a R^3} \quad \text{atau} \quad N a = \frac{G D^4}{64 k R^3} \quad (3.15)$$

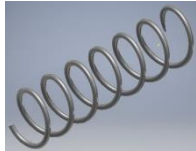
dimana L adalah panjang kawat dan Na yaitu jumlah lilitan pada pegas.

$$\begin{aligned} \frac{L}{2\pi R} &= \frac{G D^4}{64 k R^3} \\ L &= \frac{2\pi G D^4}{64 k R^2} = \frac{2 \times 3,14 \times 12 \times 10^6 \times 0,0787^4}{64 \times 3,332 \times 0,7486^2} \\ &= 24,2054 \text{ in} \\ &= 615,242 \text{ mm} \\ N a &= \frac{L}{2\pi R} = \frac{24,2054}{2 \times 3,14 \times 0,7486} = 5,1 \text{ lilitan} \end{aligned}$$

Karena pegas yang diinginkan yaitu jenis *squred end* maka:

$$N_t \text{ (jumlah lilitan total)} = N a + 1,5 = 6,5 \text{ lilitan}$$

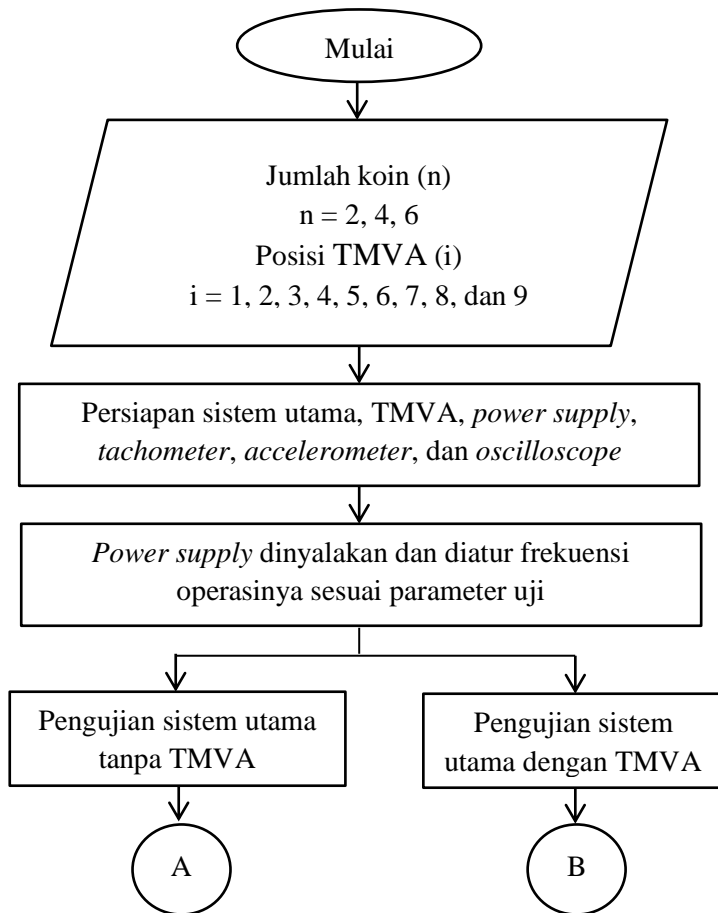
Dengan mempertimbangkan osilasi maksimum dari TMVA didapatkan dari hasil simulasi matlab yaitu 35 mm. Dan *body* selongsong akrilik yang digunakan setinggi 190 mm dengan tebal total untuk 6 koin yaitu 48 mm, maka tinggi pegas dalam keadaan normal (h_f) ditentukan sebesar 75 mm.

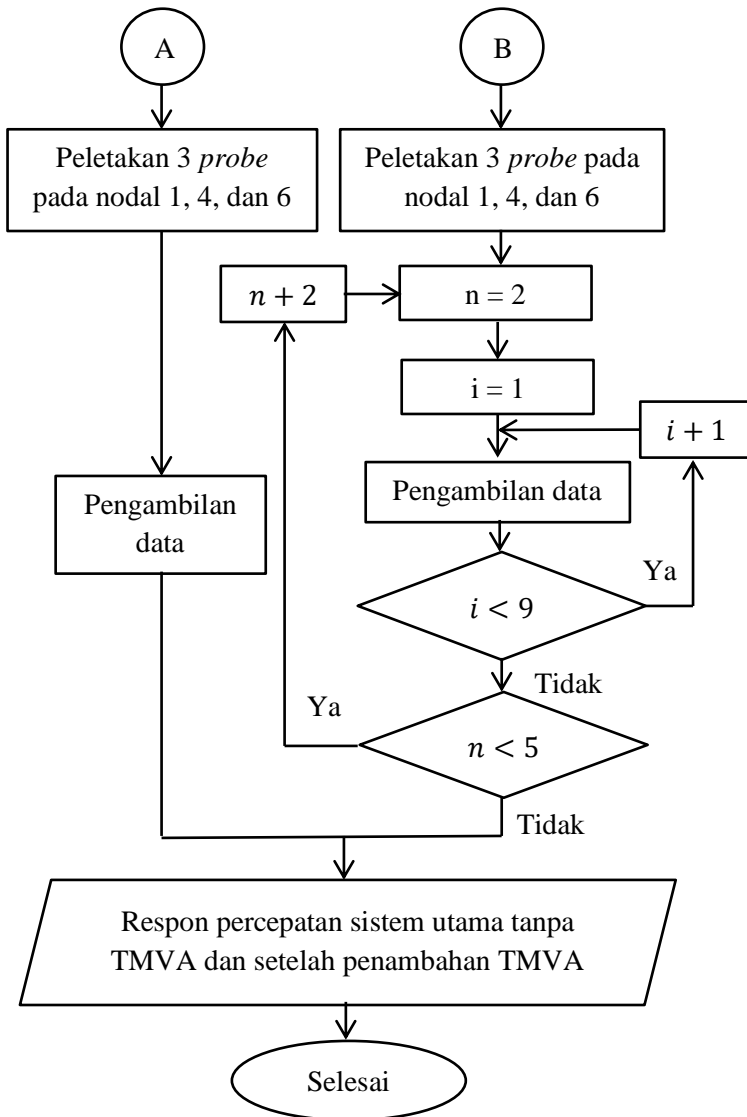


Gambar 3.16 Pegas TMVA

3.2.5 Eksperimen

Dalam penelitian ini akan dilakukan 2 jenis eksperimen, yaitu eksperimen untuk sistem utama saja dan sistem utama yang telah ditambahkan TMVA sebagai peredam getarannya. Gambar 3.17 di bawah ini merupakan *flowchart* pelaksanaan eksperimen, sebagai berikut:

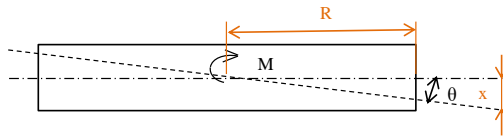




Gambar 3.17 Flowchart Sistematika Pelaksanaan Eksperimen

3.2.6 Pengambilan Data Eksperimen

Eksperimen dilakukan untuk mendapatkan respon getaran sistem utama yang dapat dimonitor dari pembacaan percepatan melalui *oscilloscope* dengan menggunakan *probe accelerometer*. *Probe accelerometer* diletakkan pada tiga titik pengujian/nodal, dimana masing-masing nodal dapat merepresentasikan posisi pergerakan massa secara translasi, *rolling*, dan *pitching*. Nodal-nodal tersebut berada pada titik 1, 4, dan 6, seperti pada gambar 3.10.



Gambar 3. 18 Gerak Rotasi pada Plat *Exciter*

Pemilihan ketiga nodal didasarkan pada teorema cosinus, yang pada umumnya dinotasikan dengan:

$$\sin \theta = \frac{\text{panjang sisi depan}}{\text{panjang sisi miring}} = \frac{x}{R}$$

dimana θ bernilai sangat kecil, sehingga

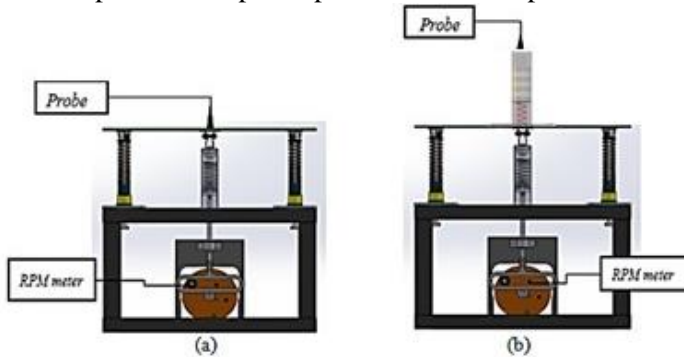
$$\sin \theta = \theta, \text{ jadi}$$

$$\theta = \frac{x}{R} \text{ atau } x = R \cdot \theta \quad (3.16)$$

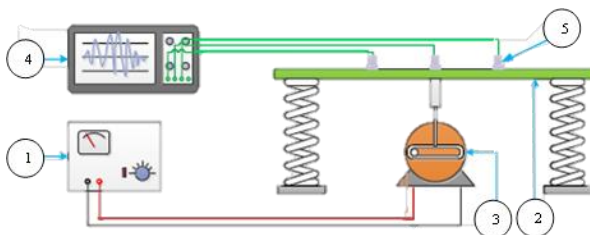
Dari persamaan di atas, dapat diketahui bahwa panjang lengan (R) berbanding lurus dengan perpindahan (x). Dapat dikatakan bahwa semakin jauh posisi penempatan TMVA terhadap titik pusat plat *exciter*, maka semakin besar perpindahan akibat getaran yang ditimbulkan, sehingga efek gerak rotasi menjadi lebih mudah diamati.

Eksperimen dilakukan dalam dua kondisi, yaitu kondisi sistem utama tanpa menggunakan TMVA dan dengan penambahan TMVA di atas plat *exciter*. *Probe* pada kondisi percobaan pertama, langsung ditempelkan di atas plat *exciter*.

Sedangkan untuk kondisi kedua, *probe* akan ditempelkan di atas tutup TMVA, tepat pada titik pusatnya. Pada kondisi ini, akan jumlah koin pemberat akan divariasikan dengan nilai 2, 4, dan 6 buah dengan cara penambahan jumlah koin yang ditumpukkan vertikal di dalam selongsong silinder. Selain itu, dilakukan pula variasi posisi peletakan TMVA pada 9 titik.



Gambar 3.19 Posisi Pengujian dengan *Probe Accelerometer*
(a) Sistem Utama tanpa TMVA dan (b) Sistem Utama dengan TMVA



Gambar 3.20 Skema Alat Pengujian

Keterangan:

- | | |
|--------------------|-------------------------|
| 1. Power Supply | 4. Digital oscilloscope |
| 2. Plat exciter | 5. Probe accelerometer |
| 3. Motor penggerak | |

Tabel 3.2 Data Eksperimen Respon Percepatan Sistem Utama

Tanpa TMVA				Dengan TMVA				
Frekuensi natural (rad/s)	Letak <i>probe</i>			Jumlah koin (buah)	Posisi TMVA (m)	ω_{n1} (rad/s)		
	<i>nodal</i> 1	<i>nodal</i> 2	<i>nodal</i> 3			Letak <i>probe</i>		
						<i>nodal</i> 1	<i>nodal</i> 2	<i>nodal</i> 3
(m/s ²)	(m/s ²)	(m/s ²)						
ω_{n1}				2	<i>node</i> 1			
					<i>node</i> 2			
					<i>node</i> 3			
					<i>node</i> 4			
					<i>node</i> 5			
					<i>node</i> 6			
					<i>node</i> 7			
					<i>node</i> 8			
					<i>node</i> 9			
				4	<i>node</i> 1			
					<i>node</i> 2			
					<i>node</i> 3			
					<i>node</i> 4			
					<i>node</i> 5			
					<i>node</i> 6			
					<i>node</i> 7			
					<i>node</i> 8			
					<i>node</i> 9			
				6	<i>node</i> 1			
					<i>node</i> 2			
					<i>node</i> 3			
					<i>node</i> 4			
					<i>node</i> 5			
					<i>node</i> 6			
					<i>node</i> 7			
					<i>node</i> 8			
					<i>node</i> 9			

Eksperimen ini dilakukan untuk mereduksi getaran sistem utama pada frekuensi natural pertama, dimana pada kondisi tersebut nilai amplitudonya paling tinggi. Untuk membatasi *range* penelitian, maka frekuensi operasi dari motor diatur sedemikian sehingga bernilai sama dengan frekuensi natural pertama.

Hasil eksperimen yang diperoleh berupa respon percepatan getaran sistem utama tanpa TMVA dan dengan TMVA. Selanjutnya hasil pada kedua kondisi tersebut dibandingkan untuk mendapatkan reduksi respon getaran. Dari reduksi tersebut, dapat diketahui mengetahui seberapa efektif penggunaan TMVA yang dibuat pada penelitian ini.

Data-data yang telah diperoleh disajikan ke dalam beberapa grafik sebagai berikut:

1. Grafik RMS respon percepatan translasi, *rolling*, dan *pitching* pada sistem utama tanpa TMVA.
2. Grafik RMS dan reduksi respon getaran translasi, *rolling*, dan *pitching* pada sistem utama dengan TMVA untuk variasi jumlah koin TMVA.
3. Grafik RMS dan reduksi respon getaran translasi, *rolling*, dan *pitching* pada sistem utama dengan TMVA untuk variasi posisi peletakan TMVA.

3.2.7 Analisa Data dan Pembahasan

Berdasarkan hasil pengujian alat, akan dilakukan analisa data dan pembahasan sesuai dasar teori yang ada. Selanjutnya, dapat diketahui hubungan variasi jumlah koin dan posisi TMVA terhadap reduksi respon sistem utama.

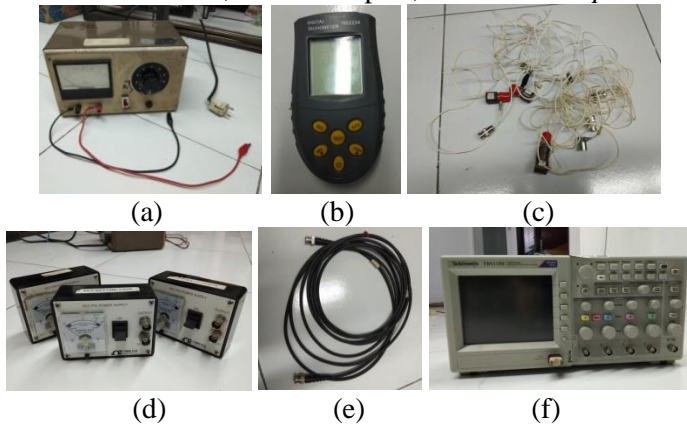
3.2.8 Kesimpulan dan Saran

Dari analisa data dan pembahasan, dapat ditarik kesimpulan dan saran mengenai penelitian yang telah dilakukan. Kesimpulan menyangkut poin-poin penting pembahasan hasil eksperimen serta menjawab tujuan penelitian. Saran yang dibuat dapat digunakan sebagai masukan untuk penelitian selanjutnya.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pelaksanaan dan Kelengkapan Alat Eksperimen

Perlengkapan yang digunakan dalam eksperimen ini yaitu, *power supply*, sistem utama, TMVA, *tachometer*, 3 buah *probe accelerometer*, 3 buah adaptor, dan *oscilloscope*.



Gambar 4. 1 Perlengkapan Eksperimen (a) *Power Supply*, (b) *Tachometer*, (c) *Probe Accelerometer*, (d) Adaptor, (e) Kabel Penghubung Adaptor dengan *Oscilloscope*, (f) *Oscilloscope*

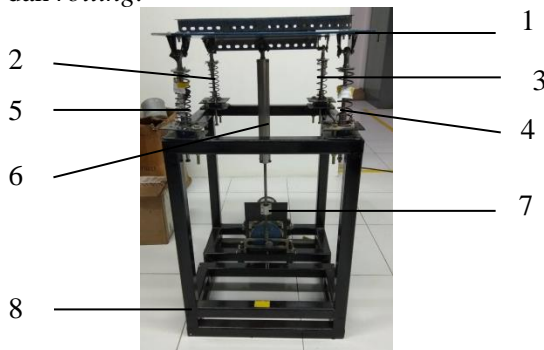
Power supply berfungsi sebagai sumber tenaga untuk menjalankan motor sistem utama. TMVA digunakan untuk meredam getaran berlebih dari sistem utama. *Tachometer* sebagai alat pembaca kecepatan angular motor dalam satuan RPM. Tiga buah *probe* sebagai sensor pendeteksi respon percepatan sistem utama yang disambungkan pada tiga buah adaptor untuk menyuply daya. *Oscilloscope* merupakan alat untuk menampilkan dan merekam data hasil pembacaan *probe*.



Gambar 4. 2 Pelaksanaan Eksperimen

4.1.1 Sistem Utama

Sistem utama telah disempurnakan pada penellitian sebelumnya oleh Nauval Adhytia dengan mengganti rangka dasar menggunakan besi yang lebih *rigid*. Alat simulator getar ini merepresentasikan getaran pada mesin-mesin industri yang terdiri dari plat *exciter* dari material aluminium berukuran (50 x 50 x 0,6) cm, poros penggerak, dan empat buah pegas dengan nilai kekakuan masing-masing berbeda. Sehingga alat tersebut mampu menghasilkan gerak ke arah translasi, *pitching*, dan *rolling*.



Gambar 4. 3 Sistem Utama

Keterangan:

- | | |
|----------------------|-----------------------------|
| 1. Massa utama | 5. Pegas D (k_D) |
| 2. Pegas A (k_A) | 6. Pegas penunjuk (k_O) |
| 3. Pegas B (k_B) | 7. Motor DC |
| 4. Pegas C (k_C) | 8. Rangka |

Berikut ini merupakan spesifikasi sistem utama:

Massa sistem utama	= 6,7 kg
k_A	= 1.896 N/m
k_B	= 2.510 N/m
k_C	= 3.311 N/m
k_D	= 3.955 N/m

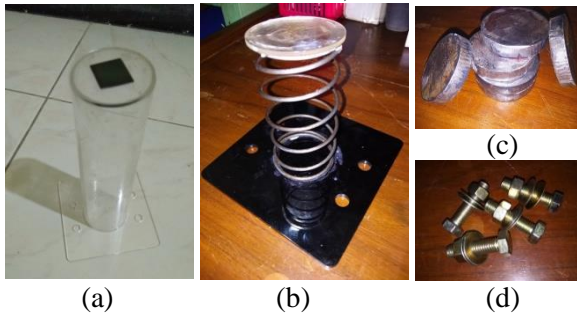
4.1.2 *Translational Mass Vibration Absorber* (TMVA)

Telah dibuat sebuah peredam getaran, yaitu *Translational Mass Vibration Absorber* (TMVA) yang terdiri dari beberapa buah koin besi sebagai massa TMVA (m_2), sebuah pegas dengan kekakuan 583,6 N/m, dan selongsong akrilik sebagai *body* luarnya. Arah pergerakan TMVA hanya terbatas pada translasi vertikal. Penelitian sistem utama yang telah ditambahkan TMVA, akan memvariasikan jumlah koin dan posisi peletakan TMVA pada plat *exciter*. Jumlah koin akan divariasikan menjadi 2, 4, dan 6 koin sehingga rasio massa TMVA terhadap sistem utama yang digunakan yaitu 1/40, 2/40, dan 3/40. Dan TMVA akan diletakkan pada 6 titik yang berbeda di atas plat *exciter*.

Pegas *absorber* yang digunakan pada penelitian ini, menggunakan material baja dengan spesifikasi sesuai hasil perhitungan pada bab 3. Dengan menentukan diameter kawat 2 mm, jari-jari relatif pegas 19 mm, dan tinggi pegas awal 75 mm, maka didapatkan jumlah lilitan sebanyak 6,5 lilitan.



Gambar 4. 4 TMVA (*Translational Mass Vibration Absorber*)



Gambar 4. 5 Komponen-Komponen TMVA (a) Selongsong Akrilik, (b) Pegas Baja dan Alas TMVA, (c) 6 Buah Koin Pemberat, dan (d) Mur dan Baut

4.2 Analisa Eksperimen

Pada sub bab ini, akan dijelaskan analisa data hasil eksperimen. Eksperimen dilakukan pada sistem utama tanpa TMVA dan sistem utama yang telah ditambahkan TMVA untuk arah pergerakan translasi vertikal, *rolling*, dan *pitching*. Input yang diberikan berupa variasi jumlah koin pemberat dan posisi peletakan TMVA. Output yang didapat berupa respon percepatan translasi, *rolling*, dan *pitching*, yang selanjutnya diolah menjadi grafik RMS masing-masing variasi dan persentase reduksi respon getaran.

4.2.1 Sistem Utama tanpa TMVA

Telah dilakukan eksperimen untuk sistem utama tanpa TMVA pada frekuensi operasi sama dengan frekuensi natural. Dalam praktiknya, frekuensi natural massa utama yang terbaca oleh *tachometer* sebesar 376,8 rpm atau setara dengan 6,280 Hz. Nilai tersebut relatif sama dengan hasil simulasi matlab, yaitu sebesar 6,302 Hz. Hasil eksperimen yang didapat berupa data *time* terhadap voltase yang terbaca pada layar *oscilloscope*. Data voltase tersebut selanjutnya dikonversi menjadi respon percepatan menggunakan rumus berikut^[10]:

$$\ddot{x} = \frac{G}{V} g \quad (4.1)$$

Dimana :

- \ddot{x} = Respon percepatan linear (m/s²)
- G = data yang akan diolah dikalikan skala pembacaan *oscilloscope* (V)
- V = sensitivitas *accelerometer* (1 V)
- g = percepatan gravitasi (9,81 m/s²)

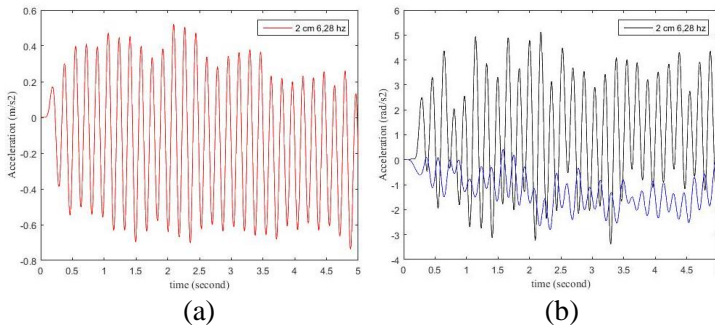
$$\ddot{\theta} = \frac{\ddot{x}_R - \ddot{x}_T}{l_{TR}} \quad (4.2)$$

Dimana:

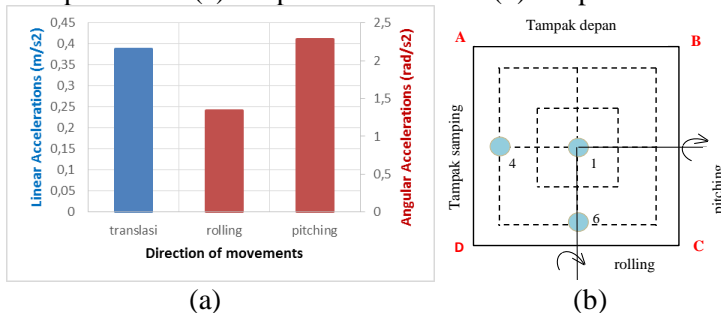
- $\ddot{\theta}$ = respon percepatan angular (rad/s²)
- \ddot{x}_T = respon percepatan linear dari gerak translasi (m/s²)
- \ddot{x}_R = respon percepatan linear dari gerak rotasi (m/s²)
- l_{TR} = jarak peletakan *probe* pendeteksi gerak translasi terhadap rotasi (m)

Selanjutnya, data *filter* untuk menghilangkan *noise* dan *dsmoothing* untuk memperhalus grafik hasil pengujian. Sehingga dapat diketahui nilai RMS (*root mean square*) untuk masing-masing arah pergerakan. Grafik hasil filter yang dioperasikan pada amplitudo 2 cm dan frekuensi operasi 6,28 Hz dapat dilihat pada gambar 4.6. Grafik berwarna merah merupakan respon percepatan translasi. Sedangkan grafik

berwarna biru merupakan respon percepatan *rolling*, dan hitam untuk *pitching*.



Gambar 4. 6 Hasil *Smoothing* dan *Filtering* Sistem Utama tanpa TMVA (a) Respon Translasi dan (b) Respon Rotasi



Gambar 4. 7 (a) Grafik RMS 3 dof untuk Sistem Utama tanpa TMVA (b) Posisi Peletakan *Probe* pada Plat *Exciter*

Dalam pengujian ini, akan digunakan 3 *probe* yang diletakkan pada *node* 1, 4, dan 6 seperti gambar 4.7 (b). Pergerakan plat secara translasi yang paling *uniform* terjadi di titik tengah plat. Sehingga pelatakan *probe* 1 akan mendeteksi pergerakan translasi. *Probe* 4 diletakkan pada bagian terluar plat dan tegak lurus terhadap sumbu *rolling*, sehingga *probe* tersebut paling efektif dalam membaca respon getaran *rolling*.

Sedangkan *probe* 6 tegak lurus terhadap sumbu *pitching*, sehingga akan lebih efektif dalam mendeteksi respon getaran *pitching*.

Gambar 4.7 (a) menunjukkan nilai RMS dari hasil pengujian adalah $0,3876 \text{ m/s}^2$ untuk respon getaran translasi, $1,3403 \text{ rad/s}^2$ untuk *rolling*, dan $2,2854 \text{ rad/s}^2$ untuk *pitching*. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa respon getaran *pitching* memiliki nilai paling tinggi dibandingkan respon pergerakan lainnya.

Rolling dan *pitching* sama-sama gerak rotasi, namun nilai *pitching* lebih tinggi dibanding *rolling*. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan konstanta pegas pada keempat titik, yaitu A, B, C, dan D. Hubungan nilai konstanta pegas untuk masing-masing titik adalah $k_A < k_B < k_C < k_D$. Sehingga, dilihat dari sisi depan, terlihat bahwa pegas D sedikit lebih kaku dibanding C. Sedangkan dari sisi samping, pegas D jauh lebih kaku dibanding A. Akibatnya, ketika sisi depan mengalami *rolling*, sudut perpindahan yang dialami lebih kecil dibanding sudut perpindahan *pitching* pada sisi samping. Dimana besarnya sudut perpindahan yang ditimbulkan plat, sebanding dengan nilai respon getarnya.

4.2.2 Sistem Utama dengan Penambahan TMVA

Eksperimen sistem utama dengan penambahan TMVA telah dilakukan dan didapat respon getaran untuk masing-masing variasi eksperimen. Respon getaran yang akan dianalisa adalah respon percepatan dari massa utama.

4.2.2.1 Analisa Respon Percepatan dengan Variasi Jumlah Koin Pemberat

Pada penelitian ini, variasi jumlah koin yang digunakan adalah 2, 4, dan 6 buah. Koin-koin pemberat berperan sebagai massa TMVA (m_2), dimana masing-masing koin memiliki berat $0,08375 \text{ kg}$.

Sub bab ini akan membahas analisa respon getaran sistem utama yang telah ditambahkan TMVA untuk arah pergerakan translasi, *rolling*, dan *pitching* menggunakan variasi jumlah koin. Output yang diperoleh untuk getaran ke arah translasi berupa respon percepatan linear (m/s^2). Sedangkan getaran *rolling* dan *pitching* menghasilkan respon percepatan angular (rad/s^2). Respon ini dibandingkan terhadap respon sistem utama sebelum ditambahkan TMVA, sehingga diperoleh nilai persentase reduksi getaran.

4.2.2.1.1 Analisa Respon Percepatan Translasi Variasi Jumlah Koin Pemberat

Respon percepatan translasi sistem utama sebelum dan sesudah ditambahkan TMVA dirangkum ke dalam tabel 4.1. Persentase reduksi respon getaran didapatkan melalui rumusan sebagai berikut:

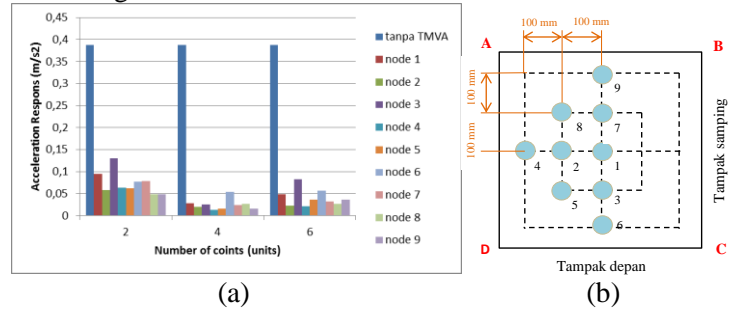
$$\frac{\text{sebelum}-\text{sesudah}}{\text{sebelum}} \times 100\% \quad (4.3)$$

Persentase reduksi terbesar pada pergerakan translasi terjadi pada *node* 4 dengan jumlah koin 4 buah, yaitu senilai 96,49 % dan nilai RMSnya adalah $13,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$. Sedangkan nilai persentase terkecil yaitu 66,38% terjadi pada *node* 3 variasi 2 buah koin, dengan nilai RMS sebesar $130,3 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$. Untuk mengetahui lebih jelasnya, nilai respon percepatan dan reduksi gerak translasi akan diuraikan pada tabel 4.1 sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Data Respon Percepatan Translasi

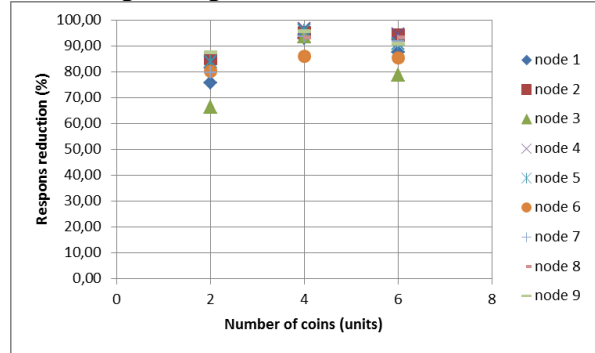
Posisi TMVA	Jumlah Koin (buah)	Respon Percepatan (m/s^2)		Reduksi (%)
		Tanpa TMVA	Dengan TMVA	
node 1	2	$387,6 \times 10^{-3}$	$94,7 \times 10^{-3}$	75,57
	4		$27,6 \times 10^{-3}$	92,88
	6		$48,7 \times 10^{-3}$	87,44
node 2	2		$58,2 \times 10^{-3}$	84,98
	4		$19,6 \times 10^{-3}$	94,94
	6		$23,2 \times 10^{-3}$	94,01
node 3	2		$130,3 \times 10^{-3}$	66,38
	4		$24,8 \times 10^{-3}$	93,6
	6		$82,3 \times 10^{-3}$	78,77
node 4	2		$64,1 \times 10^{-3}$	83,46
	4		$13,6 \times 10^{-3}$	96,49
	6		$21,2 \times 10^{-3}$	94,53
node 5	2		$62,2 \times 10^{-3}$	83,95
	4		$15,6 \times 10^{-3}$	95,98
	6		$36,0 \times 10^{-3}$	90,71
node 6	2		$77,0 \times 10^{-3}$	80,13
	4		$53,8 \times 10^{-3}$	86,12
	6		$57,3 \times 10^{-3}$	85,22
node 7	2		$78,6 \times 10^{-3}$	79,72
	4		$24,6 \times 10^{-3}$	93,65
	6		$32,3 \times 10^{-3}$	91,67
node 8	2		$48,3 \times 10^{-3}$	87,54
	4		$26,6 \times 10^{-3}$	93,14
	6		$26,3 \times 10^{-3}$	93,21
node 9	2		$48,6 \times 10^{-3}$	87,46
	4		$16,5 \times 10^{-3}$	95,74
	6		$35,6 \times 10^{-3}$	90,82

Untuk mengetahui hubungan respon percepatan terhadap variasi jumlah koin, maka data di atas digambarkan ke dalam grafik RMS berikut:



Gambar 4. 8 (a) Grafik RMS Respon Percepatan Translasi Variasi Jumlah Koin dan (b) Variasi Posisi Peletakan TMVA pada Plat *Exciter*

Gambar 4.8 (a) merupakan grafik RMS percepatan sistem utama yang telah ditambahkan TMVA dengan variasi jumlah koin 2, 4, dan 6 buah. Sedangkan gambar 4.8 (b) menunjukkan bahwa terdapat 9 *node* peletakan TMVA, dan semua titik mengalami gerak translasi.



Gambar 4. 9 Grafik Reduksi Respon Getaran Translasi Variasi Jumlah Koin

Grafik 4.8 (a) menunjukkan nilai respon percepatan tanpa TMVA jauh lebih tinggi dibanding setelah penambahan TMVA, artinya penambahan TMVA berhasil meredam getaran sistem utama pada semua variasi jumlah koin dan posisi. Grafik 4.8 (a) memiliki *trend* menurun kemudian naik pada jumlah koin 6 buah, kecuali pada *node* 8 yang mengalami sedikit penurunan setelah penambahan 6 koin. Grafik RMS dan grafik reduksi memiliki hubungan yang berkebalikan, sehingga *trendline* grafik 4.9 yaitu naik kemudian turun. Hal ini berarti, penambahan 4 koin paling baik dalam meredam getaran sistem utama ke arah translasi.

Nilai respon percepatan tertinggi terjadi pada *node* 3 dengan variasi 2 buah koin. Sedangkan respon terendah terjadi pada *node* 4 dengan variasi 4 buah koin. Sehingga dapat disimpulkan bahwa redaman translasi paling efektif terjadi ketika TMVA berada pada *node* 4 dengan variasi 4 buah koin.

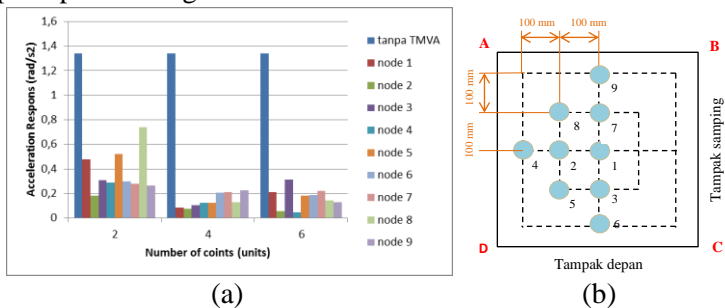
4.2.2.1.2 Analisa Respon Percepatan *Rolling* Variasi Jumlah Koin Pemberat

Respon getaran *rolling* dibaca oleh *probe* 4 sesuai gambar 4.7 (b), dan kesembilan variasi *node* pada gambar 4.8 (b) memiliki respon yang berbeda-beda. Nilai-nilai tersebut dijabarkan ke dalam tabel 4.2 berikut ini:

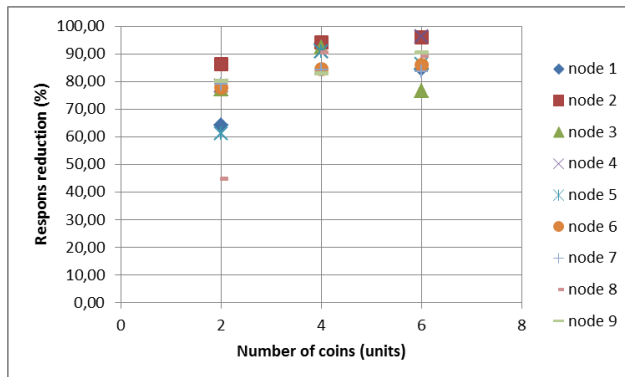
Tabel 4. 2 Data Respon Percepatan *Rolling*

Posisi TMVA	Jumlah Koin (buah)	Respon Percepatan (rad/s ²)		Reduksi (%)
		Tanpa TMVA	Dengan TMVA	
node 1	2	1.340,3 x 10 ⁻³	478,6 x 10 ⁻³	64,29
	4		86,6 x 10 ⁻³	93,54
	6		209,9 x 10 ⁻³	84,34
node 2	2		183,8 x 10 ⁻³	86,29
	4		77,8 x 10 ⁻³	94,2
	6		54,1 x 10 ⁻³	95,96
node 3	2		305,9 x 10 ⁻³	77,18
	4		102,5 x 10 ⁻³	92,35
	6		312,3 x 10 ⁻³	76,7
node 4	2		289,6 x 10 ⁻³	78,39
	4		124,9 x 10 ⁻³	90,68
	6		48,5 x 10 ⁻³	96,38
node 5	2		521,6 x 10 ⁻³	61,08
	4		122,9 x 10 ⁻³	90,83
	6		183,5 x 10 ⁻³	86,31
node 6	2		296,5 x 10 ⁻³	77,88
	4		208,4 x 10 ⁻³	84,45
	6		187,3 x 10 ⁻³	86,03
node 7	2		280,1 x 10 ⁻³	79,1
	4		210,7 x 10 ⁻³	84,28
	6		219,6 x 10 ⁻³	83,62
node 8	2		739,5 x 10 ⁻³	44,83
	4		129,0 x 10 ⁻³	90,38
	6		141,5 x 10 ⁻³	89,44
node 9	2		264,2 x 10 ⁻³	80,29
	4		227,7 x 10 ⁻³	83,01
	6		128,1 x 10 ⁻³	90,44

Dari data di atas, dapat dilihat bahwa persentase reduksi respon getaran *rolling* terbesar yaitu 96,38 % pada *node 4* dengan variasi jumlah koin sebanyak 6 buah. Pada posisi tersebut, nilai RMS nya sebesar $48,5 \times 10^{-3} \text{ rad/s}^2$. Sedangkan persentase terkecil yaitu 44,83 % pada *node 8* dengan variasi jumlah koin sebanyak 2 buah. Dari data di atas, dapat digambarkan grafik RMS dan grafik reduksi respon percepatan sebagai berikut:



Gambar 4. 10 (a)Grafik RMS Percepatan *Rolling* Variasi Jumlah Koin dan (b) Variasi Posisi Peletakan TMVA pada Plat *Exciter*



Gambar 4. 11 Grafik Reduksi Respon Percepatan *Rolling* Variasi Jumlah Koin

Gambar 4.10 (a) dan gambar 4.11 menunjukkan bahwa *trendline* respon percepatan mengalami penurunan kemudian naik pada variasi 6 koin, kecuali *node* 2, 4, 6, dan 9. Sehingga *trendline* reduksi menunjukkan peningkatan kemudian turun pada variasi 6 koin. Dengan kata lain, penambahan jumlah koin sebanyak 4 buah paling baik dalam meredam getaran sistem utama.

Nilai respon percepatan tertinggi terjadi pada *node* 8 dengan variasi 2 buah koin. Sedangkan respon terendah terjadi pada *node* 4 dengan variasi 6 buah koin. Sehingga dapat disimpulkan bahwa redaman *rolling* paling efektif terjadi ketika TMVA berada pada *node* 4 dengan variasi 6 buah koin.

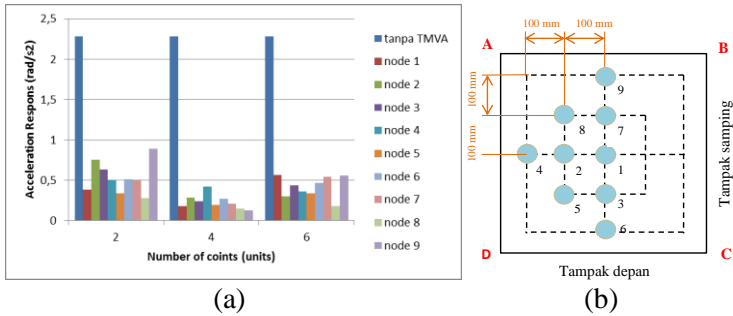
4.2.2.1.3 Analisa ResponPercepatan *Pitching* Variasi Jumlah Koin Pemberat

Respon getaran *pitching* dibaca oleh *probe* 6 sesuai gambar 4.7 (b), dan kesembilan variasi *node* memiliki respon yang berbeda-beda.

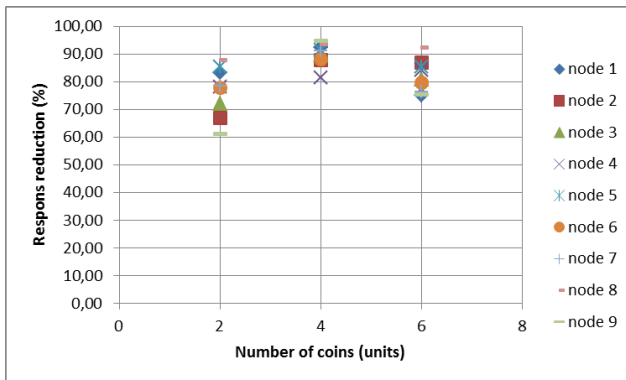
Persentase reduksi respon getaran *pitching* terbesar yaitu 94,60 % pada *node* 9 dengan variasi jumlah koin sebanyak 4 buah. Pada posisi tersebut, nilai RMS nya sebesar $123,5 \times 10^{-3} \text{ rad/s}^2$. Sedangkan persentase terkecil yaitu 61,23% pada *node* 9 dengan variasi jumlah koin sebanyak 2 buah. Untuk lebih jelasnya, nilai respon percepatan dan reduksi respon *pitching* dijabarkan ke dalam tabel 4.3 berikut:

Tabel 4. 3 Data Respon Percepatan *Pitching*

Posisi TMVA	Jumlah Koin (buah)	Respon Percepatan (rad/s^2)		Reduksi (%)
		Tanpa TMVA	Dengan TMVA	
node 1	2	$2.285,4 \times 10^{-3}$	$381,5 \times 10^{-3}$	83,31
	4		$175,6 \times 10^{-3}$	92,32
	6		$566,8 \times 10^{-3}$	75,2
node 2	2		$753,5 \times 10^{-3}$	67,03
	4		$281,0 \times 10^{-3}$	87,7
	6		$301,1 \times 10^{-3}$	86,83
node 3	2		$635,6 \times 10^{-3}$	72,19
	4		$236,8 \times 10^{-3}$	89,64
	6		$437,7 \times 10^{-3}$	80,85
node 4	2		$500,3 \times 10^{-3}$	78,11
	4		$423,2 \times 10^{-3}$	81,48
	6		$362,8 \times 10^{-3}$	84,13
node 5	2		$334,0 \times 10^{-3}$	85,39
	4		$196,2 \times 10^{-3}$	91,42
	6		$336,2 \times 10^{-3}$	85,29
node 6	2		$508,7 \times 10^{-3}$	77,74
	4		$271,5 \times 10^{-3}$	88,12
	6		$468,6 \times 10^{-3}$	79,5
node 7	2		$494,0 \times 10^{-3}$	78,38
	4		$206,1 \times 10^{-3}$	90,98
	6		$544,2 \times 10^{-3}$	76,19
node 8	2		$277,7 \times 10^{-3}$	87,85
	4		$147,9 \times 10^{-3}$	93,53
	6		$175,1 \times 10^{-3}$	92,34
node 9	2		$886,1 \times 10^{-3}$	61,23
	4		$123,5 \times 10^{-3}$	94,6
	6		$559,9 \times 10^{-3}$	75,5



Gambar 4. 12 (a) Grafik RMS Percepatan *Pitching* Variasi Jumlah Koin dan (b) Variasi Posisi Peletakan TMVA pada Plat *Exciter*



Gambar 4. 13 Grafik Reduksi Respon Percepatan *Pitching* Variasi Jumlah Koin

Gambar 4.12 (a) dan gambar 4.13 menunjukkan bahwa *trendline* respon percepatan mengalami penurunan kemudian naik pada variasi 6 koin, kecuali *node 4*. Sehingga *trendline* reduksi menunjukkan peningkatan kemudian turun pada variasi 6 koin. Dengan kata lain, penambahan jumlah koin sebanyak 4 buah paling baik dalam meredam getaran sistem utama.

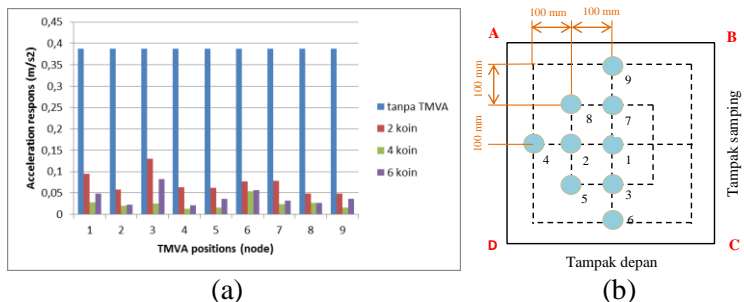
Nilai respon percepatan tertinggi terjadi pada *node* 9 dengan variasi 2 buah koin. Sedangkan respon terendah terjadi pada *node* 9 dengan variasi 4 buah koin. Sehingga dapat disimpulkan bahwa redaman *pitching* paling efektif terjadi ketika TMVA berada pada *node* 9 dengan variasi 4 buah koin.

4.2.2.2 Analisa Respon Percepatan terhadap Posisi TMVA

Pada penelitian ini, akan divariasikan posisi peletakan TMVA dalam 9 titik untuk dapat mengetahui posisi paling efektif dalam meredam getaran massa utama 3 dof. Variasi yang digunakan adalah *node* 1 pada (0, 0) mm, *node* 2 pada titik (-100, 0) mm, *node* 3 (0, -100) mm, *node* 4 (-200, 0) mm, *node* 5 (-100, -100) mm, *node* 6 (0, -200) mm, *node* 7 (0, 100) mm, *node* 8 (-100, 100) mm, dan *node* 9 (0, 200) mm dilihat dari titik pusat plat *exciter*.

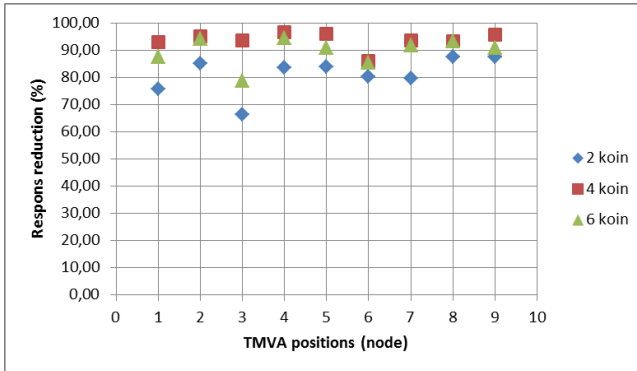
4.2.2.2.1 Analisa Respon Percepatan Translasi terhadap Posisi TMVA

Data yang digunakan untuk analisa pada subbab ini, sesuai dengan tabel 4.1. Berikut digambarkan grafik hubungan respon percepatan terhadap variasi posisi peletakan TMVA pada 9 *node*, dimana masing-masing *node* dijabarkan terhadap variasi jumlah koin.



Gambar 4. 14 (a) Grafik RMS Translasi untuk Jumlah Koin 2, 4, dan 6 Buah dengan Variasi Posisi TMVA (b) Variasi Posisi Peletakan TMVA

Nilai respon percepatan tertinggi terjadi pada *node* 3 variasi 2 koin. Sedangkan respon terendah terjadi pada *node* 4 variasi 4 koin. Selanjutnya digambarkan grafik reduksi untuk mengetahui tingkat redaman sistem utama akibat penambahan TMVA.



Gambar 4. 15 Grafik Reduksi Respon Percepatan Translasi Variasi Posisi TMVA

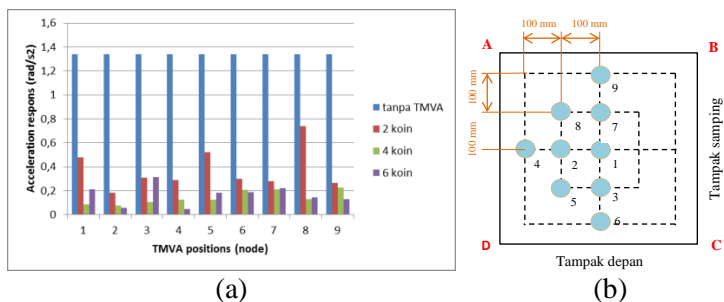
Hubungan grafik 4.14 (a) dan grafik 4.15 yaitu berbanding terbalik. Semakin besar nilai respon percepatan, maka reduksi getaran yang dihasilkan semakin kecil. Berdasarkan grafik 4.14 (a), dapat dilihat bahwa *trendline* grafik menurun pada jumlah koin 4 buah kemudian naik ketika jumlah koin menjadi 6 buah, kecuali pada *node* 8. Nilai pegas dari terkecil ke paling besar secara berturut-turut yaitu k_A , k_B , k_C , kemudian k_D . Respon percepatan *node* 9 lebih kecil dibanding respon pada *node* 6, karena *node* 9 berada pada sisi pegas lemah, sehingga simpangan yang dihasilkan lebih besar dibanding *node* 6 yang berada pada sisi pegas kaku. Akibatnya, TMVA memiliki kemampuan lebih baik untuk meredam pada posisi 9. Jika ditinjau dari posisi TMVAny, daerah plat yang ditumpu oleh pegas terlemah memiliki respon

percepatan lebih kecil dibanding daerah yang ditumpu oleh pegas terkuat.

Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin dekat letak TMVA terhadap sisi pegas terlemah, maka respon percepatan translasi yang dihasilkan semakin kecil, artinya redaman yang dihasilkan semakin baik. Dilihat dari nilai respon percepatan terendah, dapat disimpulkan bahwa peletakan TMVA paling efektif untuk meredam getaran translasi yaitu pada *node* 4 dengan jumlah koin sebanyak 4 buah.

4.2.2.2 Analisa Respon Percepatan *Rolling* terhadap Posisi TMVA

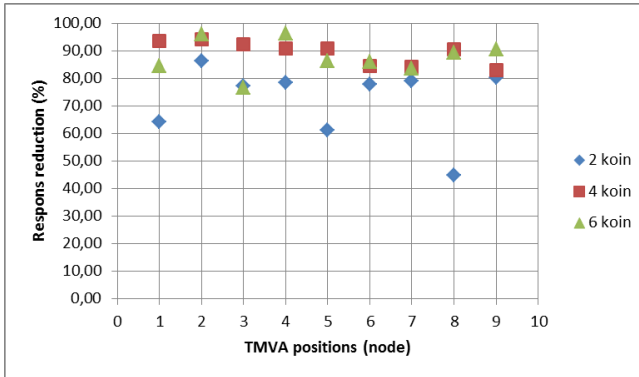
Data yang digunakan untuk analisa respon percepatan dan reduksi *rolling* sesuai dengan tabel 4.2. Berikut ini digambarkan grafik hubungan respon percepatan angular terhadap variasi posisi peletakan TMVA dalam 9 *node*:



Gambar 4. 16 (a) Grafik RMS Percepatan *Rolling* Variasi Posisi TMVA dan (b) Variasi Posisi Peletakan TMVA

Dari grafik di atas, dapat dilihat bahwa respon percepatan tertinggi terjadi pada *node* 8 variasi jumlah koin 2 buah. Sedangkan respon terendah terjadi pada *node* 4 variasi jumlah koin 6 buah. Seluruh data reduksi pada tabel 4.2 juga

diplot ke dalam grafik hubungan persentase reduksi respon terhadap *node* 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, dan 9 dimana masing-masing *node* dijabarkan untuk 3 variasi jumlah koin berikut ini:

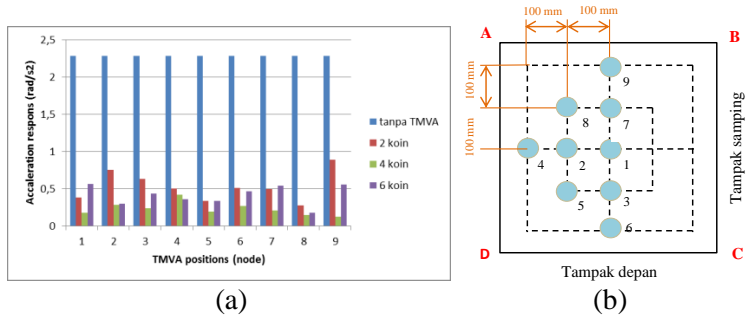


Gambar 4. 17 Grafik Reduksi Respon *Rolling* Variasi Posisi TMVA

Berdasarkan grafik 4.16 (a), dapat dilihat bahwa *trendline* grafik respon percepatan menurun dari jumlah koin 2 ke 4 kemudian naik ketika variasi 6 koin, kecuali pada *node* 2, 4, 6, dan 9. Jika ditinjau dari posisi TMVA, *node-node* yang tegak lurus terhadap sumbu *rolling*, yaitu *node* 2 dan 4 memiliki rata-rata respon percepatan lebih kecil dibanding *node-node* lainnya. Dengan kata lain, bahwa peletakan TMVA tegak lurus terhadap sumbu *rolling* memiliki redaman semakin baik. Dilihat dari nilai respon percepatan terendah, dapat disimpulkan bahwa peletakan TMVA paling efektif untuk meredam getaran *rolling* yaitu pada *node* 4 dengan jumlah koin sebanyak 6 buah.

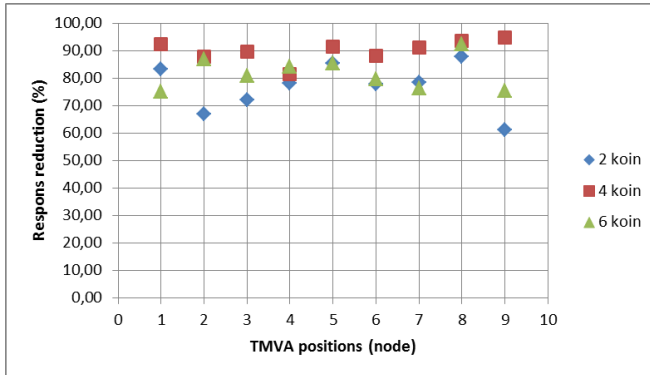
4.2.2.2.3 Analisa Respon Percepatan *Pitching* terhadap Posisi TMVA

Data yang digunakan untuk analisa respon percepatan dan reduksi *pitching* sesuai dengan tabel 4.3. Berikut ini digambarkan grafik hubungan respon percepatan angular terhadap variasi posisi peletakan TMVA dalam 9 *node*:



Gambar 4. 18 (a) Grafik RMS Percepatan *Pitching* Variasi Posisi TMVA dan (b) Variasi Posisi Peletakan TMVA

Dari grafik di atas, dapat dilihat bahwa respon percepatan tertinggi terjadi pada *node 9* variasi jumlah koin 2 buah. Sedangkan respon terendah terjadi pada *node 9* variasi jumlah koin 4 buah. Seluruh data reduksi pada tabel 4.3 diplot ke dalam grafik hubungan persentase reduksi respon terhadap kesembilan *node*, dimana masing-masing akan dijabarkan untuk 3 variasi jumlah koin berikut ini:



Gambar 4. 19 Grafik Reduksi Respon *Pitching* Variasi Posisi TMVA

Berdasarkan grafik 4.18 (a), dapat dilihat bahwa *trendline* grafik respon percepatan menurun dari jumlah koin 2 ke 4 kemudian naik ketika variasi 6 koin, kecuali pada *node* 4. Jika ditinjau dari posisi TMVA, *node-node* yang berada pada garis diagonal memiliki respon percepatan lebih rendah dibanding *node* lainnya. Namun, dilihat dari nilai respon percepatan terendah, dapat disimpulkan bahwa peletakan TMVA paling efektif untuk meredam getaran *pitching* yaitu *node* 9 yang terletak tegak lurus terhadap sumbu *pitching* dan berada pada sisi pegas terlemah dengan jumlah koin sebanyak 4 buah.

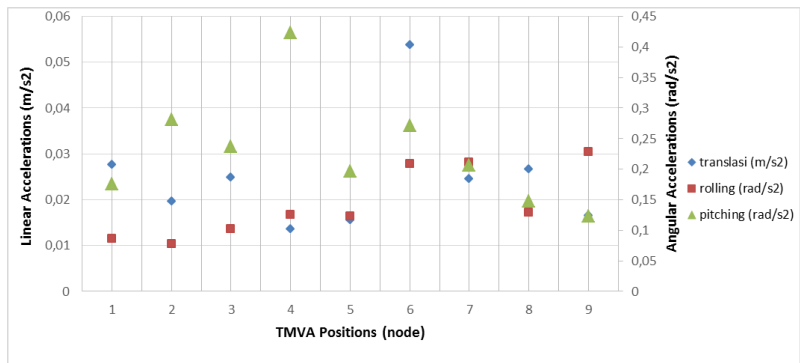
4.2.2.3 Analisa Respon Percepatan 3 DOF untuk 4 Buah Koin

Dari hasil analisa grafik RMS dan reduksi untuk variasi massa dapat diketahui bahwa jumlah koin paling efektif dalam meredam getaran sistem utama, sebanyak 4 buah koin. Sedangkan grafik RMS dan reduksi variasi posisi TMVA menyimpulkan posisi peletakan TMVA paling efektif dalam meredam masing-masing gerakan 3 dof, yaitu translasi di *node* 4, *rolling* di *node* 4, dan *pitching* di *node* 9.

Kesimpulan tersebut belum cukup untuk mengetahui dimana letak TMVA paling efektif untuk meredam ketiga arah pergerakan tersebut. Sehingga perlu diketahui hubungan translasi, *rolling*, dan *pitching* untuk jumlah koin 4 buah pada setiap variasi *node* sebagai berikut:

Tabel 4. 4 Data Respon Percepatan 3 DOF Variasi Posisi TMVA ketika Jumlah Koin 4 Buah

node	Respon Percepatan			Reduksi (%)		
	translasi (m/s ²)	rolling (rad/s ²)	pitching (rad/s ²)	translasi	rolling	pitching
1	0,0276	0,0866	0,1756	92,88	93,54	92,32
2	0,0196	0,0778	0,281	94,94	94,2	87,7
3	0,0248	0,1025	0,2368	93,6	92,35	89,64
4	0,0136	0,1249	0,4232	96,49	90,68	81,48
5	0,0156	0,1229	0,1962	95,98	90,83	91,42
6	0,0538	0,2084	0,2715	86,12	84,45	88,12
7	0,0246	0,2107	0,2061	93,65	84,28	90,98
8	0,0266	0,129	0,1479	93,14	90,38	93,53
9	0,0165	0,2277	0,1235	95,74	83,01	94,6



Gambar 4. 20 Grafik Respon Percepatan 3 DOF Variasi Posisi TMVA untuk 4 Buah Koin

Titik-titik berwarna biru menunjukkan nilai respon percepatan translasi dengan satuan m/s^2 , sedangkan titik-titik merah untuk *rolling* dan hijau untuk *pitching* memiliki satuan rad/s^2 . Dari grafik di atas, respon percepatan translasi, *rolling*, dan *pitching* untuk *node 7* memiliki nilai yang hampir setara. Respon percepatan translasi, *rolling*, dan *pitching* pada *node 5* memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan *node 7*. Namun respon percepatan *rolling* dan *pitching* untuk *node 5* memiliki perbedaan nilai yang relatif besar dibandingkan *node 7*. Sehingga ketika TMVA diletakkan pada *node 5*, pergerakan *rolling* dan translasi masih terlihat pada sistem utama. Sedangkan jika TMVA diletakkan pada *node 7*, hanya gerak translasi yang terlihat pada sistem utama. Artinya, peletakan TMVA pada *node 7* lebih baik dalam meredam getaran sistem utama dibandingkan *node-nide* lainnya pada frekuensi operasi sama dengan frekuensi natural dengan reduksi translasi senilai 93,65%, *rolling* 84,28%, dan *pitching* 90,98%.

4.2.2.4 Perbandingan Reduksi Respon Percepatan Eksperimen terhadap Hasil Simulasi

Dilakukan perbandingan hasil reduksi respon percepatan eksperimen terhadap simulasi untuk mengetahui kebenaran hasil pengujian skala lab terhadap kondisi ideal yang didapatkan dari pemrograman matlab. Berikut ditampilkan tabel reduksi dari gerak translasi, *rolling*, dan *pitching* dari hasil eksperimen dan simulasi:

Tabel 4. 5 Reduksi Respon Translasi, *Rolling*, dan *Pitching* Hasil Eksperimen dan Simulasi

Posisi TMVA	Jumlah koin (buah)	Arah Pergerakan								
		Translasi			Rolling			Pitching		
		Reduksi eksperimen (%)	Reduksi simulasi (%)	Selisih (%)	Reduksi eksperimen (%)	Reduksi simulasi (%)	Selisih (%)	Reduksi eksperimen (%)	Reduksi simulasi (%)	Selisih (%)
node 1	2	75,57	70,61	5,0	64,29	70,71	6,4	83,31	70,69	12,6
	4	92,88	97,12	4,2	93,54	96,97	3,4	92,32	97,17	4,9
	6	87,44	94,03	6,6	84,34	93,81	9,5	75,20	93,93	18,7
node 2	2	84,98	77,65	7,3	86,29	75,94	10,3	67,03	76,03	9,0
	4	94,94	97,95	3,0	94,20	96,24	2,0	87,70	97,46	9,8
	6	94,01	95,21	1,2	95,96	96,68	0,7	86,83	96,46	9,6
node 3	2	66,38	69,67	3,3	77,18	83,53	6,4	72,19	70,07	2,1
	4	93,60	97,27	3,7	92,35	88,85	3,5	89,64	97,58	7,9
	6	78,77	93,5	14,7	76,70	80,05	3,4	80,85	88,34	7,5
node 4	2	83,46	82,84	0,6	78,39	79,73	1,3	78,11	79,91	1,8
	4	96,49	98,77	2,3	90,68	97,64	7,0	81,48	95,72	14,2
	6	94,53	95,71	1,2	96,38	98,42	2,0	84,13	96,11	12,0
node 5	2	83,95	76,99	7,0	61,08	87,24	26,2	85,39	75,61	9,8
	4	95,98	98,01	2,0	90,83	91,67	0,8	91,42	96,23	4,8
	6	90,71	94,89	4,2	86,31	84,89	1,4	85,29	95,18	9,9
node 6	2	80,13	69,27	10,9	77,88	96,88	19,0	77,74	70,01	7,7
	4	86,12	96,14	10,0	84,45	74,21	10,2	88,12	97,68	9,6
	6	85,22	92,35	7,1	86,03	65,01	21,0	79,50	91,65	12,2
node 7	2	79,72	71,98	7,7	79,10	58,82	20,3	78,38	71,77	6,6
	4	93,65	97,46	3,8	84,28	84,75	0,5	90,98	97,47	6,5
	6	91,67	93,99	2,3	83,62	80,91	2,7	76,19	94,18	18,0
node 8	2	87,54	62,61	24,9	44,83	49,74	4,9	87,85	64,57	23,3
	4	93,14	96,86	3,7	90,38	95,33	5,0	93,53	97,65	4,1
	6	93,21	91,67	1,5	89,44	84,38	5,1	92,34	89,77	2,6
node 9	2	87,46	73,81	13,7	80,29	47,89	32,4	61,23	73,33	12,1
	4	95,74	98,23	2,5	83,01	81,24	1,8	94,60	98,56	4,0
	6	90,82	93,47	2,7	90,44	73,35	17,1	75,50	93,93	18,4

Dari tabel di atas, dapat dilihat bahwa selisih terbesar dari reduksi respon percepatan eksperimen terhadap simulasi pada gerak translasi yaitu 24,9 % dan selisih terkecilnya adalah 1,2 %. Sedangkan arah gerak *rolling* memiliki selisih terbesar yaitu 32,4 % dan terkecilnya adalah 0,5 %. Gerak *pitching* memiliki selisih terbesar yaitu 23,2 % dan terkecilnya adalah 1,8 %. Jika ditinjau secara keseluruhan, mayoritas reduksi respon percepatan eksperimen sudah mendekati nilai reduksi simulasi. Namun, pada beberapa titik terlihat perbedaan nilai yang cukup *significant*. Hal ini dapat disebabkan karena:

1. Adanya gesekan antara sisi keliling koin besi dengan sisi dalam selongsong.

2. Kabel internal *probe* tidak kontak sepenuhnya karena sering digulung, sehingga tegangan yang terbaca oleh *probe* terkadang sempurna kadang kurang.
3. Perlengkapan eksperimen, seperti *oscilloscope* perlu dikalibrasi ulang untuk memastikan pembacaan telah benar.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berikut ini kesimpulan hasil penelitian yang dapat diambil berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan:

1. Telah dirancang sebuah peredam untuk mereduksi getaran sistem utama, yaitu TMVA (*Translational Mass Vibration Absorber*) yang terdiri dari sebuah pegas baja dengan konstanta pegas senilai 583,6 N/m, 6 buah koin besi dengan berat masing-masing 0,08375 kg, dan selongsong akrilik sebagai *bodinya*. Eksperimen dilakukan dengan memvariasikan jumlah koin sebanyak 2, 4, dan 6 buah serta posisi peletakan TMVA ke dalam 9 titik di atas plat *exciter*. TMVA hanya memiliki 1 arah pergerakan, yaitu translasi vertikal.
2. Reduksi respon percepatan terbesar ke arah translasi dengan variasi jumlah koin terjadi pada *node 4* variasi 4 koin, yaitu 96,49% dengan RMS $13,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}^2$. Reduksi maksimal untuk *rolling* terjadi pada *node 4* variasi 6 koin, yaitu 96,38% dengan RMS $48,5 \times 10^{-3} \text{ rad/s}^2$. Sedangkan untuk *pitching* terjadi pada *node 9* variasi 4 koin, sebesar 94,6% dengan RMS $123,5 \times 10^{-3} \text{ rad/s}^2$. Sehingga dapat disimpulkan bahwa variasi jumlah koin paling efektif dalam meredam respon percepatan massa utama yaitu 4 buah koin.
3. Semakin dekat letak TMVA terhadap sisi pegas terlemah, maka respon percepatan yang dihasilkan semakin kecil, artinya redaman yang dihasilkan semakin baik. Peletakan TMVA tegak lurus terhadap sumbu rotasi, akan semakin baik dalam meredam getaran arah *rolling* maupun *pitching*. Dilihat dari nilai respon percepatan terendah, dapat diketahui

bahwa posisi TMVA paling efektif untuk meredam getaran translasi yaitu *node* 4 variasi 4 buah koin dengan reduksi 96,49%, *rolling* pada *node* 4 variasi 6 buah koin sebesar 96,38%, dan *pitching* pada *node* 9 variasi 4 buah koin yaitu 94,60%. Pengamatan secara keseluruhan untuk respon pergerakan 3 dof, menyimpulkan bahwa peletakan TMVA pada *node* 7 variasi 4 buah koin, paling baik dalam meredam getaran sistem utama pada frekuensi operasi sama dengan frekuensi natural dengan reduksi translasi senilai 93,65%, *rolling* 84,28%, dan *pitching* 90,98%.

5.2 Saran

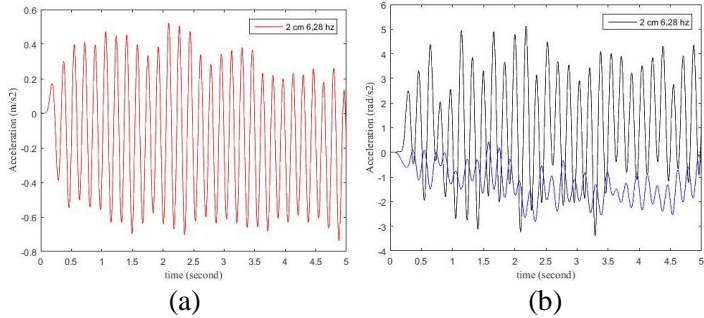
1. Sebelum melakukan eksperimen, pastikan nilai konstanta pegas sistem utama telah sesuai dengan kebutuhan. Dan pastikan pemasangan mur, baut, dan poros penghubung ke motor tidak ada yang longgar.
2. Pastikan semua alat pengujian, termasuk adaptor dalam keadaan *on* dan nilai tegangannya stabil.

DAFTAR PUSTAKA

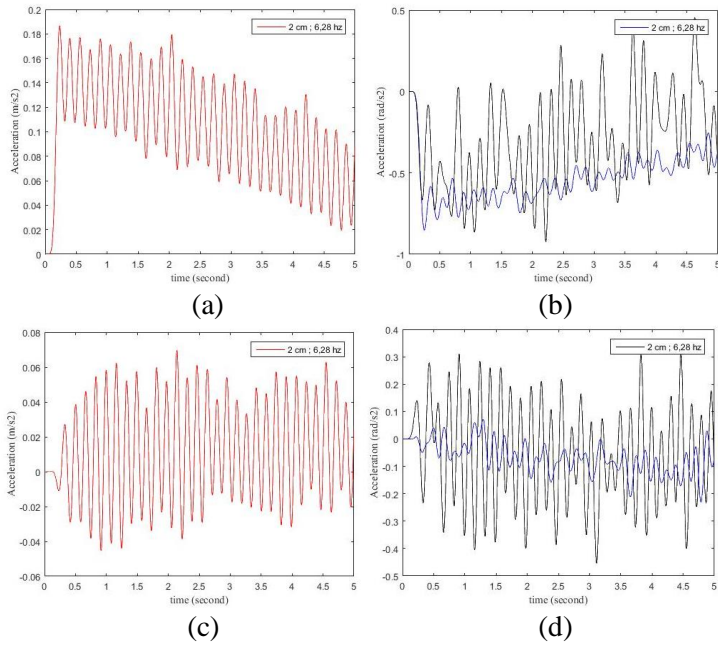
- [1] Abdulloh, A. R. 2017. **Studi Eksperimental Reduksi Respon Getaran Translasi dan Energi Listrik Bangkitan Sistem Utama oleh Mekanisme *Cantilever Piezoelektrik Double Vibration Absorber***. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Sepuluh Nopember.
- [2] Adhytia, Nauval. 2018. **Validasi Respon Getaran Multi Nodal – Multi DoF dari *Mechanical Vibration Exciter***. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Sepuluh Nopember.
- [3] Deutschman, Aaron D., dkk. 1975. ***Machine Design Theory and Practice***. New York: Macmillan Publishing Co., Inc.
- [4] Effendy, W.R. 2017. **Pemodelan dan Analisa Reduksi Respon Getaran Translasi pada Sistem Utama dan Energi Listrik yang Dihasilkan oleh Mekanisme *Dynamic Vibration Absorber Metode Cantilever Piezoelectric (CPVA)***. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [5] Jiang, K, dkk. 2015. ***Multi-DOF Rotor Model Based Measurement of Stiffness and Damping for Active Magnetic Bearing using Multi-Frequency Excitation***. Hangzhou: Elsevier.
- [6] Kurniawan, R. B. 2017. **Studi Eksperimen dan Analisis Reduksi Respon Getaran Translasi dan Rotasi dengan Menggunakan *Dynamic Vibration Absorber (DVA) Model Beam***. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Sepuluh Nopember.
- [7] O'Malley L. J. 2016. ***Response of Structure to SDoF vs MDoF Vibration Testing***. United States: Sandia National Laboratories.

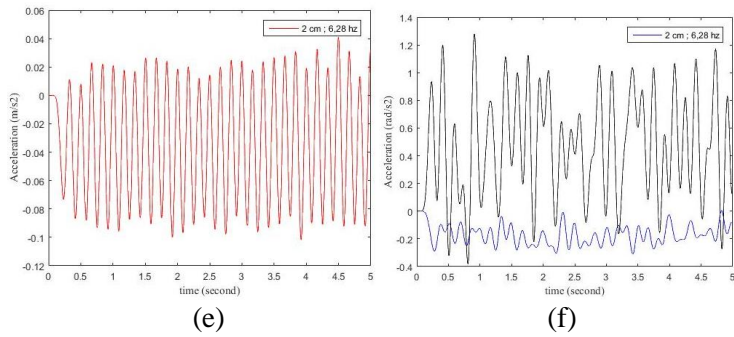
- [8] Pachpute, A. Z. dan Bawa, P. B. 2016. ***Optimum Design of Damped Dynamic Vibration Absorber***. India: *Imperial Journal of Interdisciplinary Research (IJIR)*.
- [9] Rao, S. S. 2011. ***Mechanical Vibration Fifth Edition***. Singapore: Prentice Hall.
- [10] Syahrir, Hilman. 2017. **Validasi Reduksi Getaran dan Energi Listrik yang Dihasilkan Mekanisme *Cantilever Piezoelectric Vibration Absorber* (CPVA)**. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Sepuluh Nopember.

LAMPIRAN

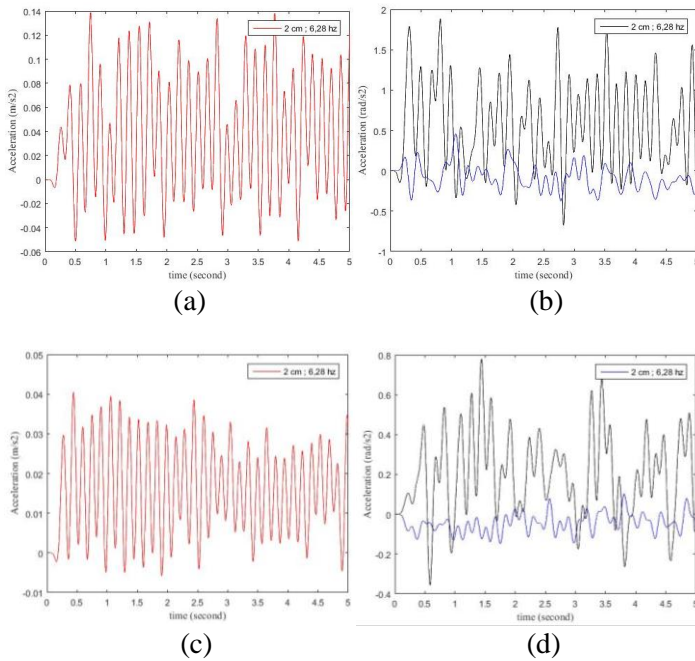


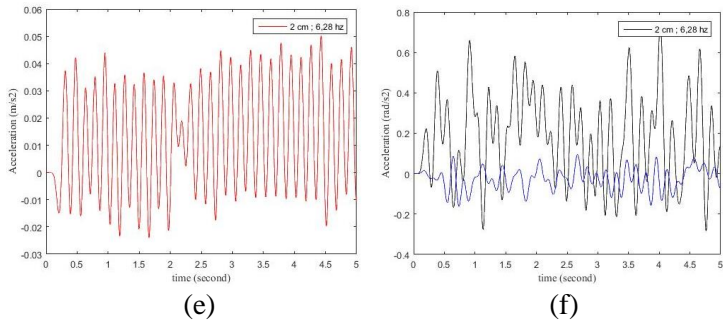
Gambar 1 Grafik Respon Percepatan Sistem Utama tanpa TMVA Hasil *Filter* dan *Smoothing* MATLAB (a) Translasi dan (b) Rotasi



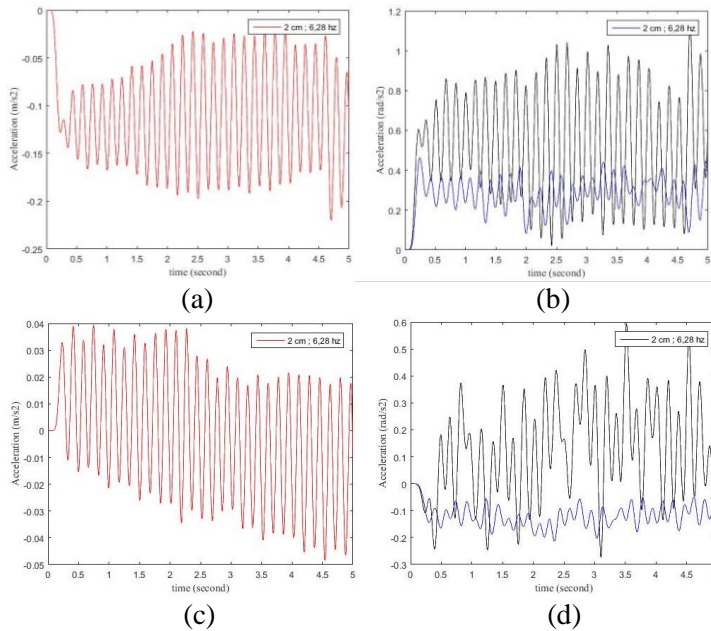


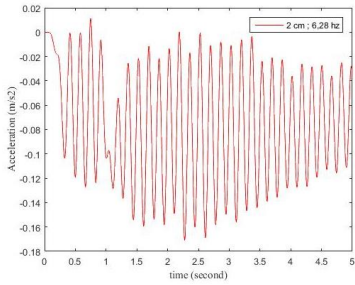
Gambar 2 Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada *Node 1* untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin



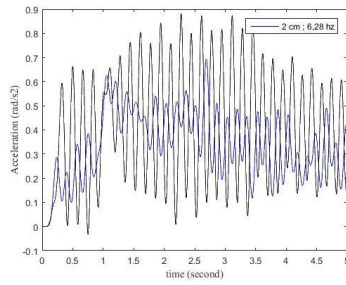


Gambar 3 Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada *Node 2* untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin



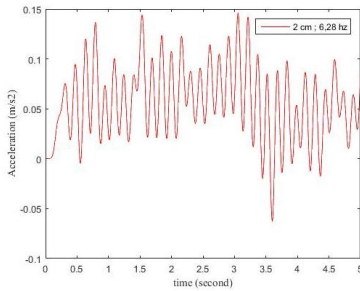


(e)

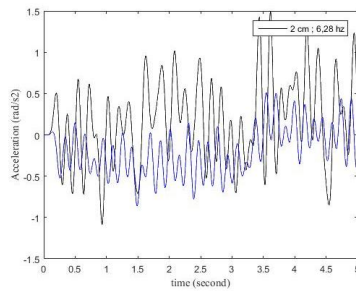


(f)

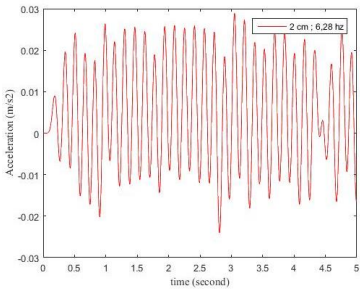
Gambar 4 Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada *Node 3* untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin



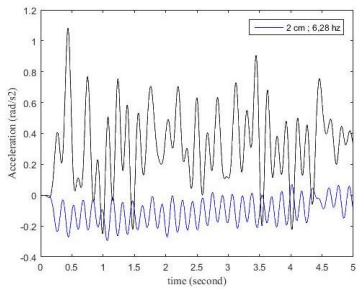
(a)



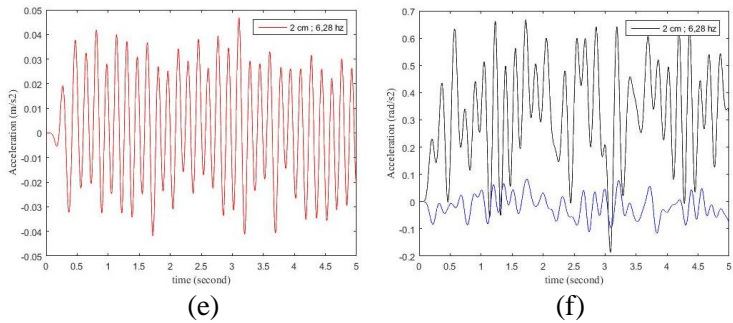
(b)



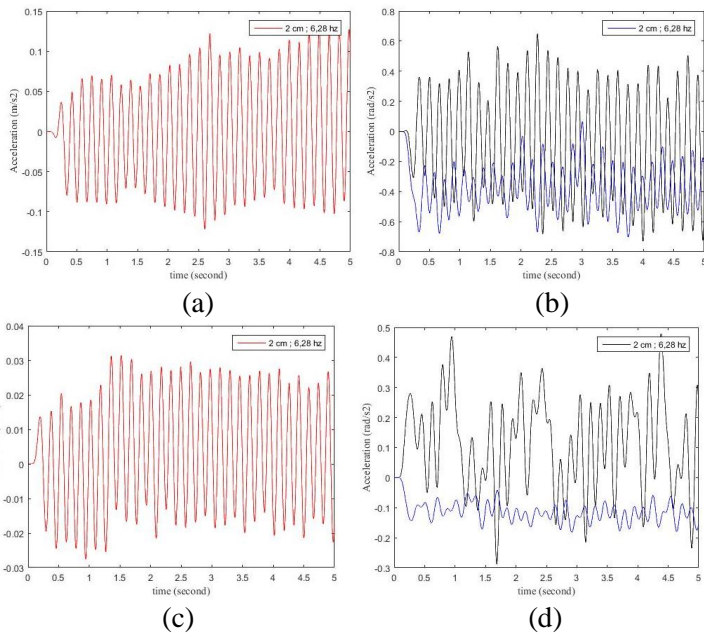
(c)

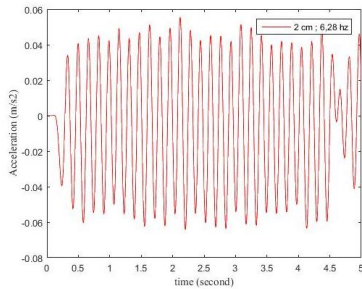


(d)

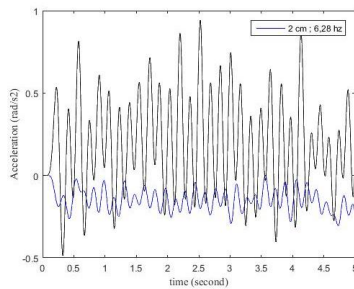


Gambar 5 Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada *Node 4* untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin



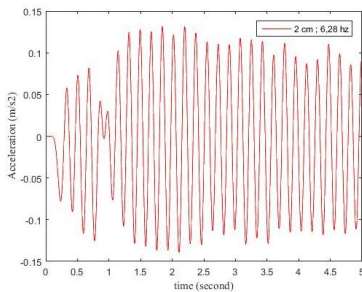


(e)

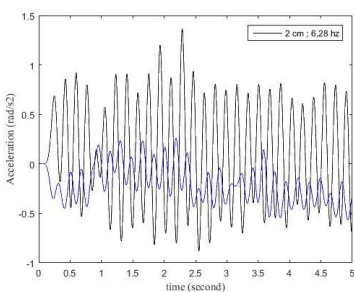


(f)

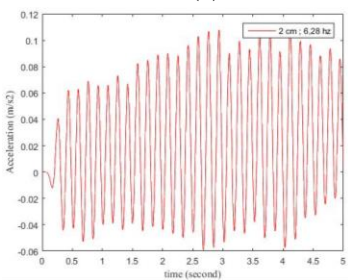
Gambar 6 Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada *Node 5* untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin



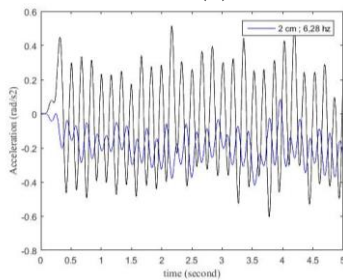
(a)



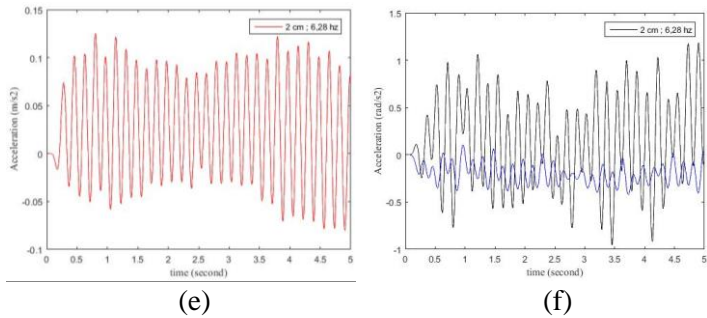
(b)



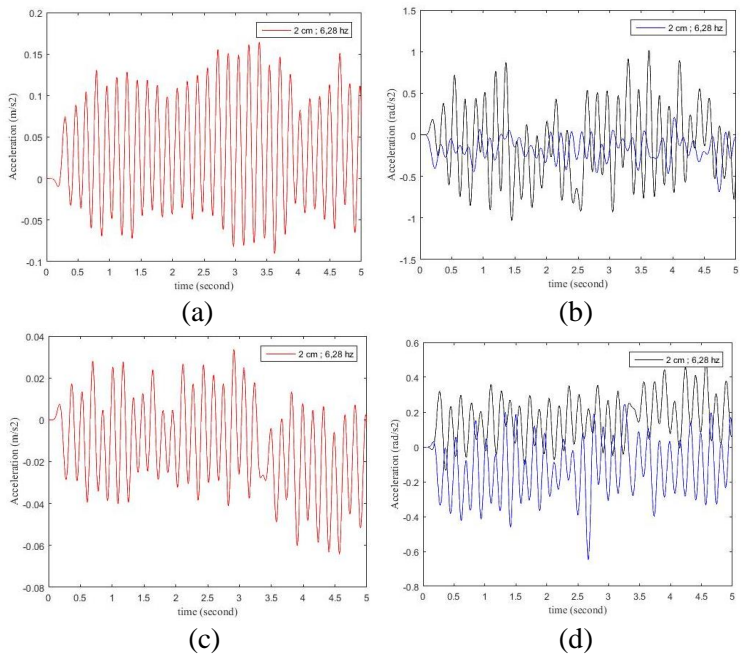
(c)

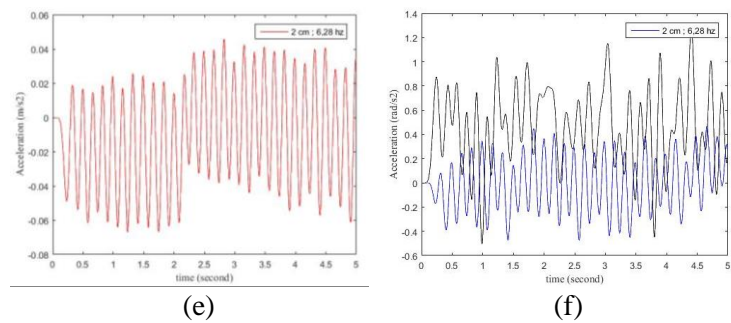


(d)

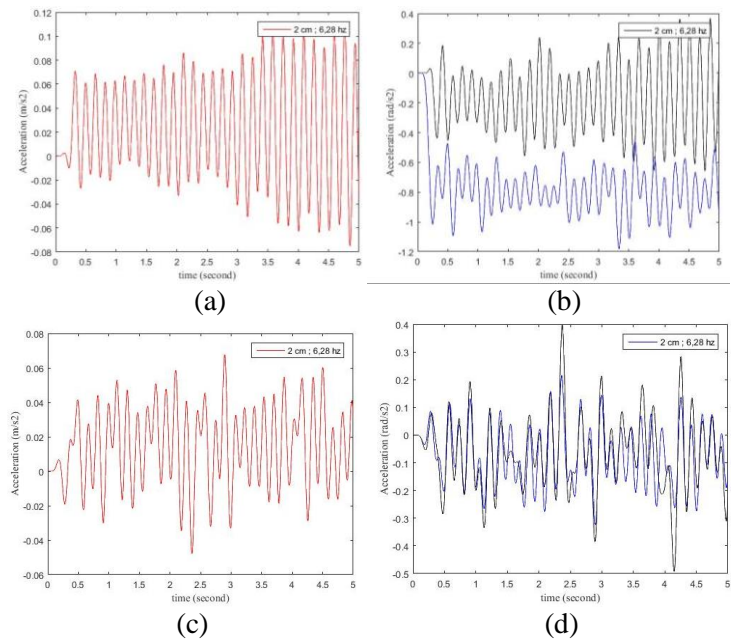


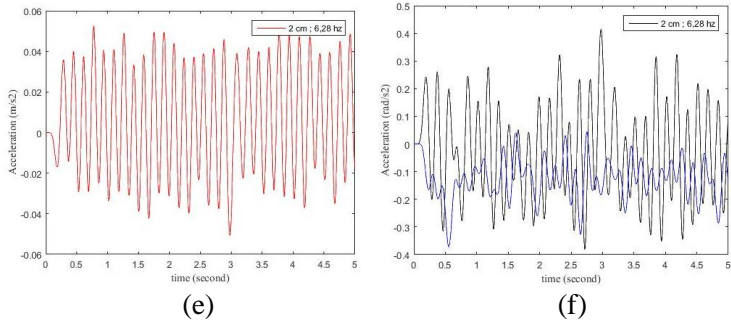
Gambar 7 Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada *Node 6* untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin



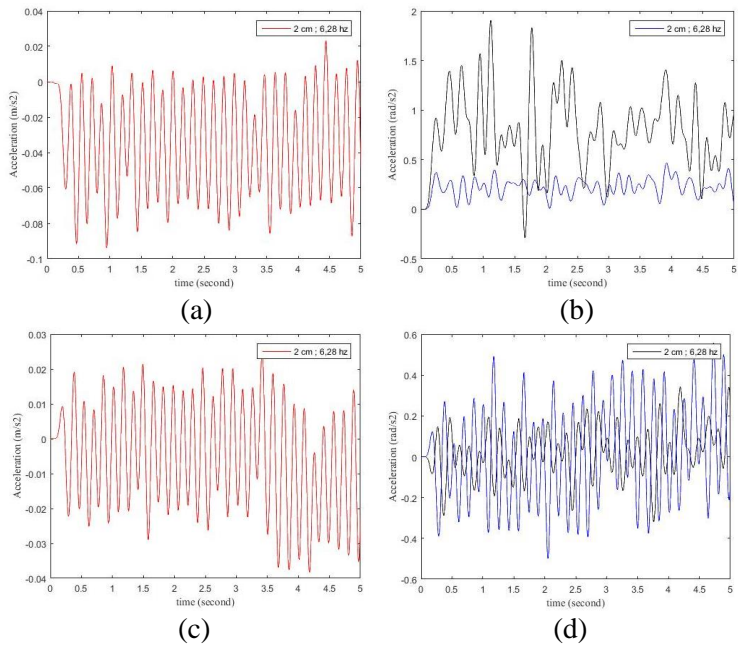


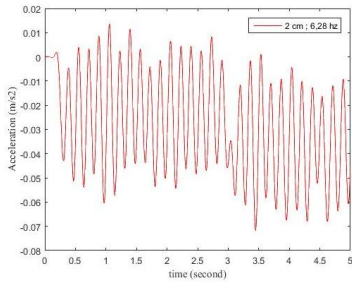
Gambar 8 Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada *Node 7* untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin



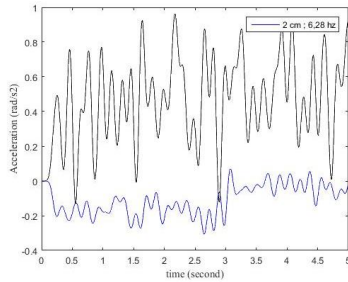


Gambar 9 Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada *Node 8* untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin





(e)



(f)

Gambar 10 Grafik Respon Percepatan Sistem Utama dengan TMVA pada *Node 9* untuk (a) Translasi 2 Koin, (b) Rotasi 2 Koin, (c) Translasi 4 Koin, (d) Rotasi 4 Koin, (e) Translasi 6 Koin, dan (f) Rotasi 6 Koin

BIODATA PENULIS



Intan Mahardika dilahirkan di kota Malang pada tanggal 6 Februari 1997 dari orang tua bernama Drs. Agus Budi Upoyo dan Dra. Sugeng Hariati. Penulis telah menempuh pendidikan formal di TK Islam Sabilillah Malang, SD Islam Sabilillah Malang, SMP Negeri 5 Malang, dan SMA Negeri 4 Malang. Setelah lulus dari SMA Negeri 4 Malang pada tahun 2014, Penulis mengikuti SNMPTN dan diterima di Jurusan S1 Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya pada tahun 2014 dan terdaftar dengan NRP 021114400093.

Penulis aktif dalam kegiatan akademik maupun non akademik selama perkuliahan. Penulis pernah menjabat sebagai aсистен praktikum mekanika getaran di laboratorium Vibrasi dan Sistem Dimanis. Selain itu, untuk mengisi kegiatan non akademik pada tahun ke-2 perkuliahan, penulis aktif menjadi staf Divisi Hubungan Luar BEM FTI-ITS serta staf Divisi *Human Resorces Development* DIMENSI Mesin FTI-ITS. Pada tahun tersebut, penulis juga aktif kepanitiaan dalam berbagai kegiatan yang diadakan jurusan, fakultas, hingga institut. Kemudian pada tahun ke-3 dilantik sebagai kepala Divisi Internal DIMENSI Mesin FTI-ITS. Pada tahun ke-4, penulis fokus menjalani akademik dan penelitian mengenai peredam geratan dan masuk sebagai anggota Laboratorium Vibrasi dan Sistem Dinamis.

Motto hidup penulis adalah “Keep Moving Forward” menjadikan penulis selalu melihat ke arah depan sehingga seberapa pun rintangan yang menghadang, penulis tidak boleh patah semangat demi menggapai masa depan yang cerah. Semua informasi dan masukan terkait tugas akhir ini, dapat menghubungi penulis melalui intan.mahardika@gmail.com.